EXAMENSARBETE

Tillståndsbaserat underhåll av spårväxlar genom statistisk processtyrning

En fallstudie enligt DMAIC

Caroline Hägglund
Oscar Jonsson

Civilingenjör, Industriell ekonomi
2019

Luleå tekniska universitet
Institutionen för ekonomi, teknik och samhälle

LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

Tillståndsbaserat underhåll av spårväxlar genom statistisk processtyrning

En fallstudie enligt DMAIC

Condition-based maintenance of railway switches using statistical process control

A case study using DMAIC approach

Examensarbete utfört inom ämnesområdet kvalitetsteknik vid

Luleå tekniska universitet och Sweco Rail i Luleå

av

Caroline Hägglund

Oscar Jonsson

Luleå 2019-01-23

Handledare:

Francesca Capaci, Luleå tekniska universitet

Peder Lundkvist, Sweco Rail

Förord

Vårterminen 2019 skrev vi det sista examinerande momentet i vår utbildning inom ämnesområdet kvalitetsteknik på Luleå tekniska universitet. Examensarbetet representerar slutet på vår studietid men även början på en ny och spännande framtid som civilingenjörer inom industriell ekonomi. Under tiden för examensarbetet har vi lärt känna en mängd kompetenta och härliga kollegor på Sweco Rail, varandra och inte minst oss själva.

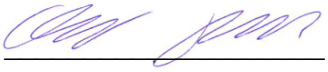
Examensarbetet har bjudit på både med- och motgångar som vi gemensamt tagit oss an. Samtliga delar i rapporten har skrivits och genomarbetats gemensamt där vi har utmanats att resonera, värdera, kommunicera och lösa problem utan självklara lösningar. Vi har utmanats att vara civilingenjörer och det överträffade våra förväntningar.

Tack vare en handfull engagerade personer är vi äntligen här, vid utbildningens målsnöre. Vi vill börja med att tacka Sweco i Luleå för att ni välkomnat oss med öppna armar. Vi vill tacka vår gruppchef Per Norrbin för att han snabbt visade intresse för oss och hjälpte oss att hitta ett lämpligt ämne för vårt examensarbete. Vi vill även rikta ett stort tack till vår handledare Francesca Capaci på Luleå tekniska universitet som alltid haft dörren öppen för våra frågor och funderingar. Francesca har en fantastisk förmåga att leta lösningar, komma med förslag och hjälpa oss hitta rätt verktyg när vi har stött på problem vilket har underlättat mycket under arbetets gång.

Sist, men definitivt inte minst, ett stort tack till vår kontaktperson Peder Lundkvist på Sweco Rail. Peder har varit vår klippa med sin gedigna expertis och erfarenhet inom kvalitetsteknik och järnvägsteknik. Det har varit ett privilegium att få jobba med en så kompetent, positiv och lösningsorienterad person. Peders intresse och engagemang har varit en stor trygghet och vår tacksamhet finner inga gränser. Tack för det stöd ni bidragit med under vårt examensarbete. Stort tack.

Luleå, juni 2019

Caroline Hägglund



Oscar Jonsson

Sammanfattning

Spårväxlar, som är en kritisk komponent på den svenska järnvägen, har ett eftersatt underhållsbehov som motsvarar en kostnad som är tre gånger större än den årliga underhållskostnaden. Från 2017 till 2018 ökade rapporteringen av funktionsfel i spårväxlar med 38 % och ungefär en tredjedel av funktionsfelen var tågstörande fel som orsakar merförseningar i tågtrafiken. Syftet med examensarbetet är att presentera rekommendationer för hur uppkomsten av tågstörande fel i spårväxlar kan reduceras genom tillståndsbaserat underhåll. Tillståndsbaserat underhåll är en kostnadseffektiv strategi som ämnar att övervaka och planera underhållsåtgärder efter tillståndet i enheten och är lämplig vid fjärrstyrd övervakning. För att uppfylla examensarbetets syfte delades projektet upp i tre delmål som besvarades genom tillämpning av problemlösningsmetoden DMAIC (*Define, Measure, Analyse, Improve* och *Control*).

Det första delmålet innefattade stegen *Define* och *Measure* och ämnade undersöka vilket funktionsfel som orsakat flest antal merförseningsminuter per fel. Orsakskategorier till tågstörande fel analyserades där *Materialutmattning/Åldrande* samt *Komponent trasig* hade ett stort antal tågstörande fel och merförseningsminuter. Orsakskategorierna bröts ner till komponentnivå varav funktionsfel i *Växellåda* identifierades att orsaka flest antal merförseningsminuter per fel. Resultatet från Delmål 1 samt de två stegen *Define* och *Measure* användes därefter till Delmål 2.

Det andra delmålet innefattade steget *Analyse* och ämnade att undersöka om det identifierade funktionsfelet i *Växellåda* kunde förutspås. Detta undersöktes genom larm från en av Trafikverkets befintliga databaser. Utifrån en grafisk analys av larmen kunde inget samband identifieras mellan funktionsfelet i *Växellåda* och larm från databasen. Därför undersöktes istället om funktionsfel i *Växellåda* kunde förutspås genom styrdiagram baserat på omläggningstid. Statistisk processtyrning är lämpligt vid övervakning av processer i realtid, men i detta examensarbetes analys användes historisk data från 2018. Den tillgängliga data hade brister i kvalitet till följd av trunkering av omläggningstiden.

Trunkeringen innebar att decimalerna har avlägsnats. I styrdiagrammen påvisades larm där den befintliga databasen inte innehöll larm. Dessutom påvisade data på omläggningstiden från flera spårväxlar signifikant autokorrelation vilket påverkar beräkning av styrgränserna. Resultatet var således svårt att tolka på grund av trunkering och autokorrelerade data. Grafisk analys av omläggningstider och medelvärdet av omläggningstiderna indikerade att 69 % av spårväxlarna hade ett troligt samband mellan funktionsfel i *Växellåda* och omläggningstiden.

Det tredje delmålet innefattade stegen *Improve* och *Control* och ämnade att upprätta rekommendationer för hur uppkomsten av funktionsfel i spårväxlar kan reduceras. Analysen i föregående delmål resulterade i följande rekommendationer:

- Öka mätnoggrannheten vid mätning av omläggningstid,
- Upprätta styrdiagram för omläggningstiden utifrån statistisk processtyrning och identifiera orsaken till autokorrelerade data, och
- Förbättra inrapportering av funktionsfel.

Abstract

Switches, which are critical components of the Swedish railway, have a neglected maintenance cost that is three times as high as their current annual maintenance cost. Between 2017 and 2018, switches' reported faults increased by 38 % and about one-third of them caused delays on the regular railway traffic. The purpose of this master thesis is to present recommendations of how condition-based maintenance could reduce the occurrence of faults in railway switches that affects the regular railway traffic. Condition-based maintenance is a cost-effective strategy designed to monitor and plan maintenance according to the condition of a device and is suitable for remote-controlled monitoring. To fulfill the purpose the thesis was divided into three milestones that were accomplished by applying the problem-solving method DMAIC (*Define, Measure, Analyse, Improve* and *Control)*.

The first milestone included the *Define* and *Measure* steps and aimed to investigate which fault caused the largest number of delay minutes per fault. Different categories of causes that affects the railway traffic were analysed. Among them, *Material-weakening/Aging* and *Broken component* resulted in many faults and delay minutes. The faults were sorted into groups at component level. Faults caused by *Gearbox* were identified as those causing the largest delays in the railway traffic. The result from the first milestone with the *Define* and *Measure* steps were then used for the second milestone.

The second milestone included the *Analyse* step where it was investigated if the identified faults in *Gearbox* could be foreseen. This investigation was first conducted through the analysis of alarms recorded in one of Trafikverket's databases. A graphical analysis of the data showed that no relationship could be identified between the faults in *Gearbox* and the recorded alarms of the database. Then, it was investigated if faults in *Gearbox* could be foreseen using statistical process control charts based on switching time. Statistical process control monitors a process using real time data. However, in this thesis we used historical data from 2018 to perform our analysis. The available data had deficiencies in quality due to truncation of the switching time. The truncation meant that the decimals were removed. The control charts issued out-of-control situations where the existing database did not record any alarm. Moreover, data on the switching time of several switches showed significant autocorrelation that affects the calculation of the control limits. However, the results appeared complex to interpret most likely because of the truncation and the autocorrelation of the data. A further graphical analysis of the switching time and the mean of the switching time indicated that 69 % of the switches had a probable relationship between faults in *Gearbox* and switching time.

The third milestone included the *Improve* and *Control* steps and provided recommendations of how to reduce the occurrence of faults in switches. The analysis conducted in the previous milestones led to the following recommendations:

- Increase measurement accuracy when measuring switching time,
- Establish control charts for the switching time based on statistical process control and explain potential causes of the observed autocorrelation, and
- Improve reporting procedures of faults in the database.

Innehållsförteckning

1 INTRODUKTION 1

1.1 BAKGRUND 1
1.2 PROBLEMBESKRIVNING 2
1.3 SYFTE OCH DELMÅL 3
1.4 AVGRÄNSNINGAR 3
1.5 RAPPORTENS DISPOSITION 4

2 TEORETISK REFERENSRAM 5

2.1 SPÅRVÄXELNS UPPBYGGNAD 5
2.2 UNDERHÅLL OCH ÖVERVAKNING AV SPÅRVÄXLAR 6
2.3 STATISTISK PROCESSTYRNING 7
2.3.1 Autokorrelerade data 9

3 METOD 10

3.1 PROBLEMLÖSNINGSMETOD 10
3.2 DATAINSAMLING 11
3.2.1 Litteratur- och dokumentstudie 11
3.2.2 Databaser 12
3.2.3 Dataanalys 15
3.3 VALIDITET 16
3.4 RELIABILITET 17

4 FALLSTUDIE – DMAIC 18

4.1 DELMÅL 1: IDENTIFIERA FUNKTIONSFEL 18
4.1.1 Define 18
4.1.2 Measure 19
4.2 DELMÅL 2: UNDERSÖK MÖJLIGHET ATT FÖRUTSPÅ IDENTIFIERAT FUNKTIONSFEL 24
4.2.1 Analyse 24
4.3 DELMÅL 3: UPPRÄTTA REKOMMENDATIONER 41
4.3.1 Improve 41
4.3.2 Control 42

5 SLUTSATSER 44

6 DISKUSSION 46

6.1 EXAMENSARBETETS ARBETSGÅNG 46
6.2 VALIDITET OCH RELIABILITET 47
6.3 FRAMTIDA STUDIER 48

7 REFERENSER 50

BILAGOR 54

Begreppslista

Generella definitioner gällande underhåll och förklaringar av järnvägsspecifika begrepp förklaras nedan.

Begrepp	**Förklaringar**
Förebyggande underhåll	Underhåll som utförs i syfte att bedöma och/eller mildra degradering och minska sannolikheten för fel hos en enhet (Swedish Standards Institute [SIS], 2019)
Förutbestämt underhåll	Förebyggande underhåll som utförs enligt bestämda tidsintervall eller efter ett bestämt antal användningstillfällen, men utan föregående tillståndskontroll (SIS, 2019)
Tillståndsbaserat underhåll	Förebyggande underhåll som inkluderar bedömning av fysiska egenskaper, analyser och möjliga efterföljande underhållsåtgärder (SIS, 2019)
Prediktivt underhåll	Tillståndsbaserat underhåll som utförs enligt en prognos som härrör från upprepade analyser eller kända egenskaper och utvärdering av signifikanta parametrar rörande enhetens degradering (SIS, 2019)
Avhjälpande underhåll	Underhåll som utförs efter det att ett feltillstånd upptäckts och med avsikt att återställa en enhet till ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion (SIS, 2019)
Funktionsfel	Tillstånd hos en enhet som kännetecknas av oförmåga att utföra krävd funktion (SIS, 2019)
Tågstörande fel	Ett funktionsfel som kopplas till minst en merförsening på minst 3 minuter (F. Andersson, personlig kommunikation, 19 februari 2019)
Merförsening	Försening jämfört med körplanen i första mätpunkten, eller tillkommande försening på minst 3 minuter mellan två mätpunkter som följer direkt efter varandra (Trafikverket, 2014)
Spårväxel	En kritisk komponent som möjliggör förgrening från ett spår till två eller fler spår

Databaser

Ofelia	Trafikverkets databas innehållande funktionsfel samt orsaker och åtgärder till funktionsfelet
Bessy	Trafikverkets databas innehållande information om besiktningar av järnvägsobjekt
DS-analys	Trafikverkets databas innehållande antal passager, antal omläggningar, omläggningstid av spårväxlar samt larm
LUPP	Trafikverkets databas innehållande bland annat tågförseningar
BIS	Trafikverkets databas innehållande information om banrelaterade anläggningar och händelser

1 Introduktion

Introduktionen behandlar examensarbetets bakgrund följt av en problembeskrivning som presenterar nuläget och utmaningar vid underhållet av spårväxlar. Därefter presenteras examensarbetets syfte och avgränsningar följt av rapportens disposition.

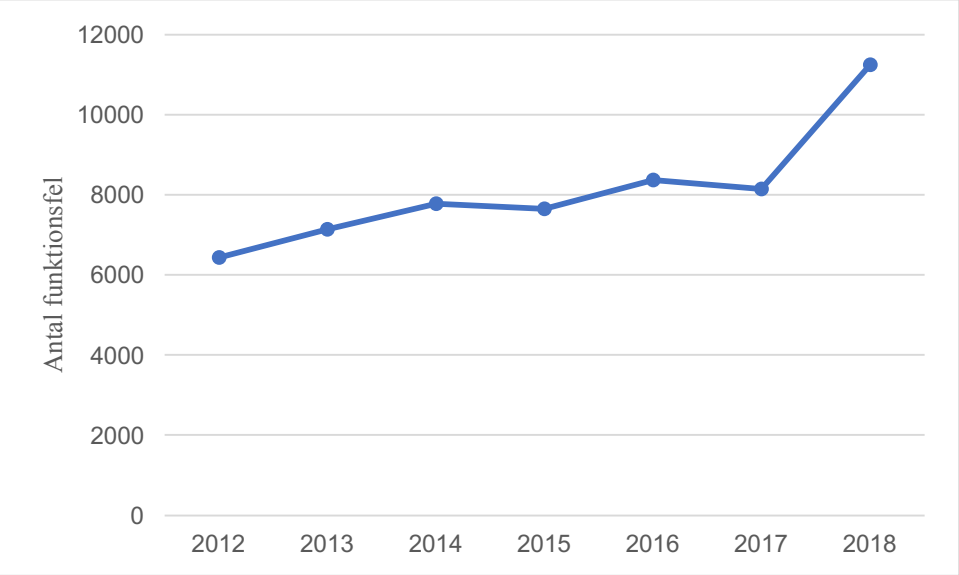
1.1 Bakgrund

År 1854 beslutade Sveriges Riksdag att börja bygga de första järnvägssträckorna i Sverige som gick mellan Stockholm, Göteborg och Malmö (Selivanova, 2018). Sedan dess har mycket hänt med järnvägen och enligt Trafikverket (2018a) finns idag över 14 000 km trafikerad bana och över 15 000 spårväxlar som är avgörande för att tågen ska kunna byta spår. Belastningen på järnvägssystemet har ökat kraftigt till följd av högre tåghastigheter, fler antal långa tåg, högre axeltryck och tätare avgångar vilket leder till att rälsen måste underhållas i större utsträckning än tidigare (Márquez, Schmid, & Collado, 2003a; Silmon & Roberts, 2010). Underhållet är viktigt ur ett säkerhetsperspektiv, men även för att minska variationen på järnvägens kvalitet och öka dess reliabilitet (Márquez et al., 2003a). Förutom potentiella säkerhetsrisker så leder låg reliabilitet på järnvägen till förseningar och finansiella förluster (Rama & Andrews, 2013). Ett ökat underhåll medför ökade kostnader, vilket innebär att resurser för underhåll måste fördelas där behovet är störst (Márquez et al., 2003a). Det bekräftas även av Silmon och Roberts (2010) som hävdar att det behövs kunskap om var och hur resurser ska fördelas för att öka reliabilitet och tillgänglighet. Wei, Jia och Liu (2012) och Rusu (2017) menar att höga kostnader för underhåll kraftigt kan reduceras om underhållet snabbt kan förutses, planeras och åtgärdas. Wei et al. (2012) anser att det är viktigt att upptäcka fel i ett tidigt skede innan den felande komponenten försämrar prestandan på tåg eller järnväg.

Traditionellt har förebyggande underhåll av järnvägsinfrastruktur byggt på regelbundna kontroller (Hegedűs et al., 2018). Det kan liknas med en form av förutbestämt underhåll som enligt SIS (2019) beskrivs som underhåll som utförs i förbestämda tidsintervall eller efter antal användningstillfällen. Ett problem med förutbestämt underhåll kan vara att det saknar information om hur processen presterar i realtid eftersom tillståndet i processen är okänt mellan inspektionerna. Márques, Schmid och Collado (2003a) argumenterar att övervakning av tillståndet i spårväxlar behöver ske i realtid och genom tillämpningen av statistiska metoder. En vanlig statistisk metod för övervakning av processer i realtid är styrdiagram som är ett verktyg inom statistisk processtyrning (Montgomery, 2013). Övervakning i realtid skulle kunna tillämpas genom fjärrstyrda övervakningssystem. Márquez och Schmid (2007) menar att med fjärrstyrda övervakningssystem kan fel upptäckas och åtgärdas innan de uppkommer vilket således minskar risken för störningar i tågtrafiken. Fjärrstyrda övervakningssystem kan därför användas tillståndsbaserat underhåll som enligt SIS (2019) bland annat inkluderar tillståndsövervakning av systemparametrar. Ett tillståndsbaserat underhåll används enligt Wang (2000) vanligen genom övervakning av en specifik enhet och om den enheten överstiger en vald parameter förklaras den felaktig och underhållsåtgärder bör vidtas. Márquez och Schmid (2007) argumenterar för att den typen av övervakning leder till ett mer kostnadseffektivt underhåll än förutbestämt underhåll vilket även bekräftas av Linderman, McKone-Sweet och Anderson (2005).

1.2 Problembeskrivning

Trafikverkets underhållskostnad för järnväg under 2016 uppgick till 7 096 miljoner SEK, där spårväxlar stod för 502 miljoner SEK (Trafikverket, 2019a). Däremot finns ett eftersatt underhållsbehov på 8 800 miljoner SEK, där spårväxlar står för 17 % vilket motsvarar 1 496 miljoner SEK (Trafikverket, 2019b). Under livstiden för spårväxlar bedöms underhållskostnaderna generellt vara större än installationskostnaderna (Márquez et al., 2003). Sedan 2012 har antalet funktionsfel visat en ökande trend och från 2017 till 2018 ökade antalet rapporterade funktionsfel med 3 104 stycken i Trafikverkets databas Ofelia, vilket motsvarar en ökning på 38 %, se Figur 1.



Figur 1. Rapporterade funktionsfel i Ofelia mellan 2012 och 2018.

Mellan 2012 och 2018 visade data från databaserna Ofelia och LUPP att ungefär en tredjedel av funktionsfelen var så kallade tågstörande fel, alltså fel som orsakar merförseningar i tågtrafiken. En merförsening är en försening på minst 3 minuter mellan två mätpunkter (Trafikverket, 2014). Enligt F. Andersson (personlig kommunikation, 19 februari 2019) har Trafikverket ett larmsystem i databasen DS-analys som ska fungera som stöd i felavhjälpning och skapa möjlighet att förutspå funktionsfel innan de inträffar. F. Andersson beskriver vidare att DS-analys automatiskt insamlar data, bland annat tid för varje enskild spårväxelomläggning, men att databasen i dagsläget inte nyttjas fullt ut. Eftersom databasen inte används fullt ut nyttjas inte heller möjligheten till felavhjälpning och möjlighet att förutspå funktionsfel, vilket hade varit angeläget då rapporterade funktionsfel ökar enligt Jönsson och Lundström (2018).

Utöver direkta kostnader för underhåll så finns även indirekta kostnader som uppkommer när spårväxlarna inte fungerar som de ska, exempel på indirekta kostnader är förseningar och inställda tåg (Lundin, 2007). Rama och Andrews (2013) säger att ökad reliabilitet kan antas leda till färre förseningar vilket enligt Lundin (2007) ger lägre indirekta kostnader. För att minska både den direkta och indirekta kostnaden kan det därav anses nödvändigt att förbättra övervakningen av spårväxlarna (Márquez et al., 2003a). Data från Ofelia och LUPP visar att spårväxlar står för 64 % av merförseningsminuterna i Sverige och enligt F. Andersson (personlig kommunikation, 19 februari 2019) visar interna analysera hos Sweco Rail att det

motsvarar en uppskattad årlig samhällsekonomisk kostnad på ca 600 miljoner SEK. Det är därför angeläget att minska de indirekta kostnaderna genom att reducera antalet merförseningsminuter till följd av spårväxelfel.

1.3 Syfte och delmål

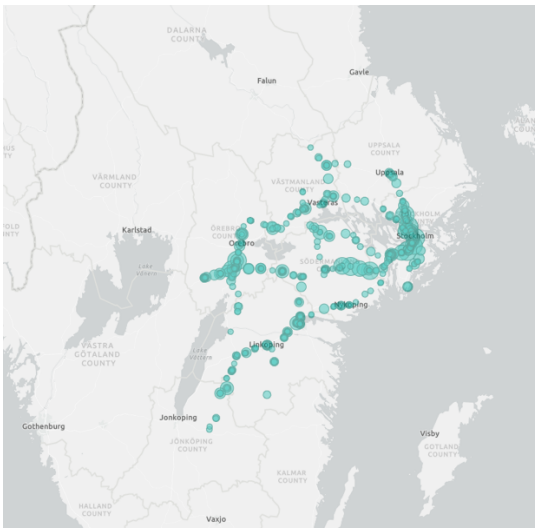
Syftet med examensarbetet är att presentera rekommendationer för hur uppkomsten av tågstörande fel i spårväxlar kan reduceras genom tillståndsbaserat underhåll.

För att uppfylla syftet bröts det ner i tre delmål:

1. Identifiera funktionsfel i spårväxlar som orsakat flest antal merförseningsminuter per fel.
2. Undersök om det finns möjlighet att förutspå funktionsfel från Delmål 1 genom;
    a. larm från Trafikverkets befintliga databas DS-analys
    b. styrdiagram från statistisk processtyrning baserade på omläggningstid
3. Upprätta rekommendationer för hur uppkomsten av funktionsfel i spårväxlar kan reduceras.

1.4 Avgränsningar

Insamlade data har avgränsats till spårväxlar i Region Öst, se Figur 2. Avgränsningen beror på att denna spårväxelpopulation har stor datamängd till följd av högtrafikerade sträckor. I en del av det avgränsade området finns ytterligare automatiskt insamlade data i form av omläggningar, passager, omläggningstid och larm i databasen DS-analys. Den stora mängden data samt tillgången till DS-analys innebär förutsättningar för att analysera samband mellan olika typer av data. I rådata från DS-analys finns även undertryckta larm som systemet bortser från på grund av att flera objekt på samma plats har haft larm samtidigt. Detta tolkar DS-analys som att larmen kommer från störningar i centrala funktioner och inte spårväxlarna. Vi har därför valt att bortse från undertryckta larm.



Figur 2. Spårväxlar i Region Öst.

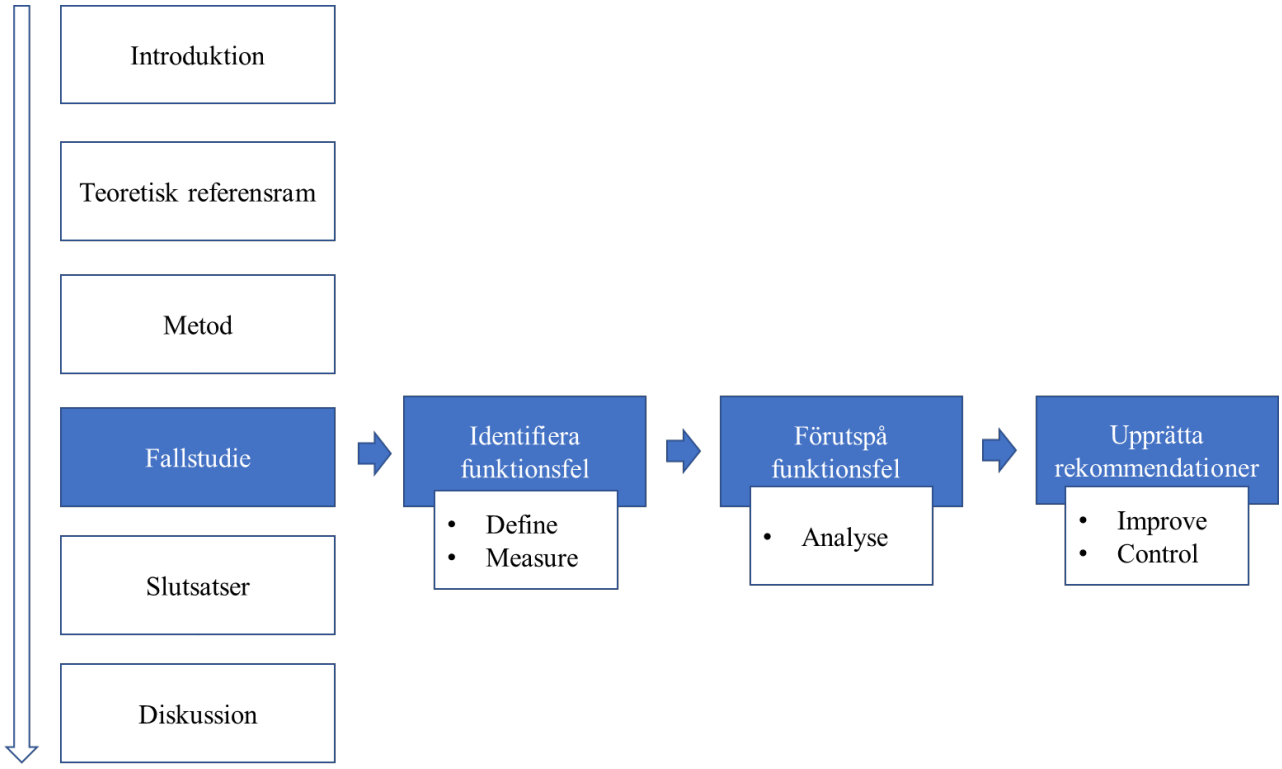
Data som behandlades i examensarbetet för att identifiera tågstörande fel var från intervallet 1 januari 2018 till 31 december 2018. Att data var insamlad i närtid till examensarbetets

genomförande möjliggjorde identifiering av aktuella problem med spårväxlarna. Under 2018 rapporterades ett stort antal funktionsfel, vilket även styrkte det valda tidsintervallet då det fanns stora mängder data att analysera.

Med hänsyn till besparingspotentialen gjordes vissa avgränsningar med avseende på kostnader. Kostnad per tågstörande fel beräknades utifrån antal merförseningsminuter per fel, vilket även användes för att bedöma allvarlighetsgraden av felet. Ju fler merförseningsminuter ett fel orsakade desto högre blev den indirekta kostnaden till följd av förseningen. Arbetskostnaden för avhjälpande felåtgärder beaktades inte på grund av svårigheter att följa upp åtgärdskostnader eftersom dessa kunde skilja efter åtgärdens omfattning.

1.5 Rapportens disposition

Rapportens fallstudie följer förbättringsprocessen DMAIC som är en förkortning av stegen *Define, Measure, Analyse, Improve* och *Control*. För att uppfylla rapportens syfte skapade vi tre delmål som genomfördes genom de fem DMAIC-stegen, se Figur 3. Resultatet av dessa beskrivs under Kapitel 4.



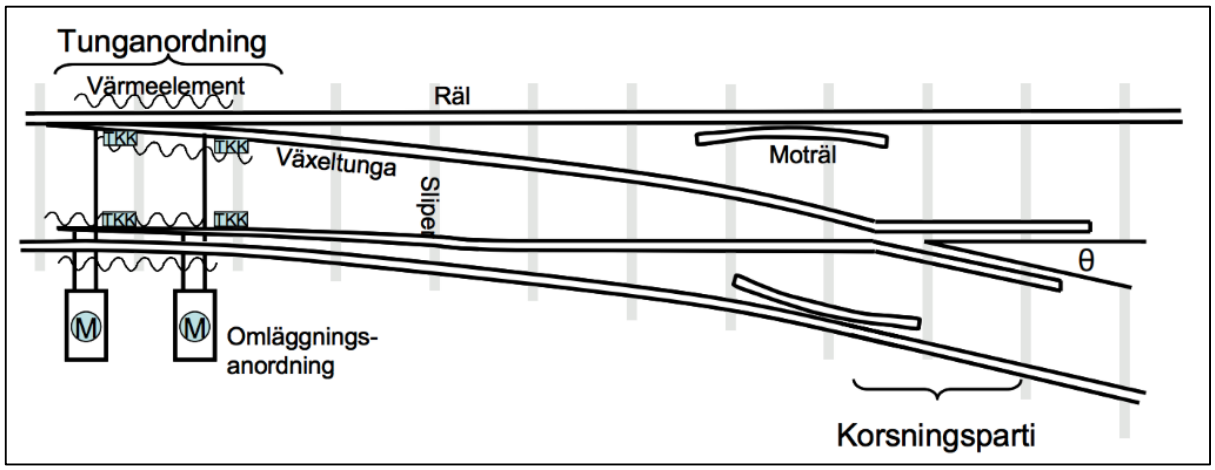
Figur 3. Rapportens disposition.

2 Teoretisk referensram

Kapitlet beskriver spårväxelns uppbyggnad, olika typer av underhåll samt tidigare studier om underhåll och övervakning inom järnvägsinfrastruktur. Avslutningsvis presenteras statistisk processtyrning och hur den kan användas vid tillståndsbaserad övervakning.

2.1 Spårväxelns uppbyggnad

Spårväxelns funktion är att tågen ska ha möjlighet att kunna byta spår och då krävs det en rörlig del i rälsen för att flytta tåget mot ett anslutande spår (Márquez et al., 2003; Hegedűs et al., 2018). I Figur 4 nedan presenteras en bild av en enkel spårväxel vilket innebär att spåret (rälen) förgrenas till två spår (Järnvägsskolan, u.å.). Enkelt beskrivet är spårväxeln uppbyggd av en tunganordning, en omläggningsanordning och ett korsningsparti (Nissen, 2005).



Figur 4. Schematisk bild över spårväxel (Nissen, 2005).

Växeltungan flyttas i sidled med hjälp av omläggningsanordningen för att kunna leda in tåget på ett annat spår (Rama & Andrews, 2013). Vintertid är det ofta problem med snö och isbildning i spårväxlarna som förhindrar att växeltungan i tunganordningen kan flyttas till rätt läge (Nissen, 2005). För att undvika isbildning finns växelvärmare i form av värmeelement eller värmekablar längs med rälen och växeltungorna (Nissen, 2005). En så kallad tungkontrollkontakt (TKK), se Figur 4, mäter om tungan ligger i rätt position för att säkerställa att tåget leds in på rätt spår (Nissen, 2005). En permanentmagnet är då fäst på växeltungan och på underläggsplattan finns en avkänningsenhet som mäter om tungan ligger i rätt läge (Trafikverksskolan, 2012). En strömkrets skapas när magneten ligger ovanför avkänningsenheten och kan attrahera denna så att kontakten sluter tätt (Trafikverksskolan, 2012). Förutom TKK finns även en kontrollanordning som är en slags låsmekanism i omläggningsanordningen som kontrollerar att växeltungan ligger i rätt position (Trafikverksskolan, 2012). Både kontrollanordningen och TKK måste visa att växeltungan ligger i rätt position innan tåg får passera genom spårväxeln (Nissen, 2005).

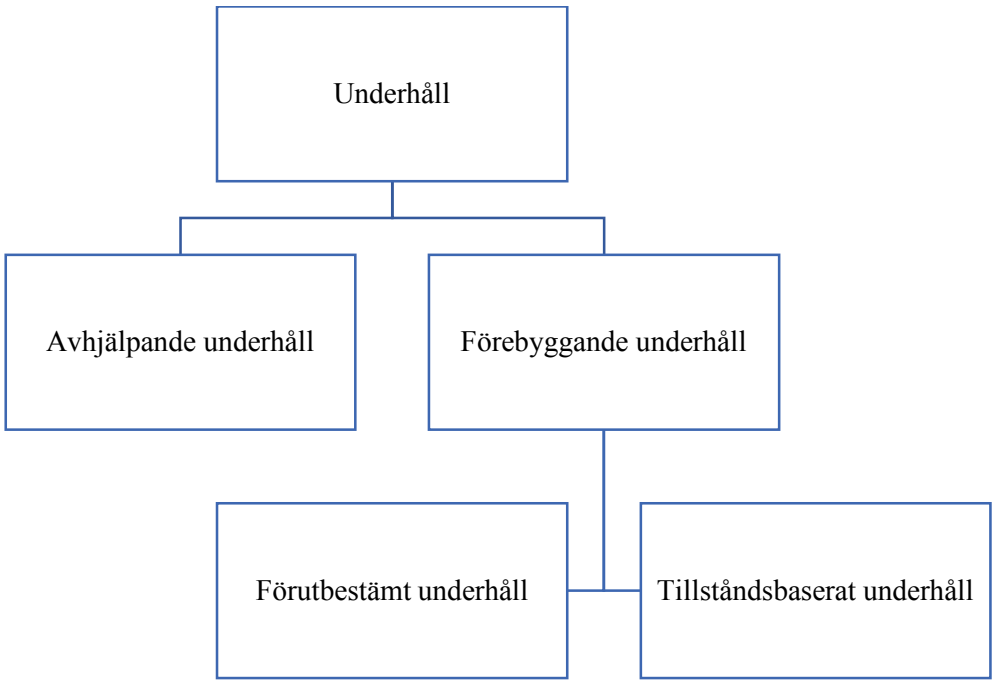
Omläggningsanordning ligger utanför spåret och kan antingen vara manuell eller elektrisk (Trafikverksskolan, 2012). Den elektriska omläggningsanordningen har ett växeldriv som bland annat består av en elektrisk motor och växellåda som lägger om spårväxeln när ström kopplas på (Trafikverksskolan, 2012). Motorn i omläggningsdelen ger kraft till växellådan som

genom två dragstänger flyttar växeltungan i sidled (Trafikverksskolan, 2012). Växellådan har en justerbar friktionskoppling som skyddar motorn om omläggning av växeltungan förhindras på grund av exempelvis främmande föremål mellan tunga och räl. Det innebär att motorströmmen bryts om växeltungan inte är i rätt position efter 12 sekunder, därför kan friktionskopplingen slira i maximalt 12 sekunder (Trafikverksskolan, 2012). När växeltungan ligger i rätt position bryts strömmen automatiskt och växeltungan läggs i kontrollerat läge med hjälp av låsmekanismen i kontrollanordningen. Omläggningen kan göras antingen lokalt eller centralt från ett ställverk (Trafikverksskolan, 2012).

Korsningspartiet är den delen där spåren förgrenas och består av räler och korsningsspets (Rama & Andrews, 2013). Korsningspartiet är en kritisk del då det finns risk för urspårning om tågets hjul träffar korsningsspetsen, därför finns moträler som hjälper tågen att passera genom växeln utan att glida mot korsningsspetsen (Nissen, 2005).

2.2 Underhåll och övervakning av spårväxlar

Målet med underhåll kan ses som att maximera livslängden av ett objekt (Fumeo, Oneto, & Anguita, 2015). Standarden SIS (2019) beskriver både avhjälpande och förebyggande underhåll, där det förebyggande underhållet antingen kan vara förutbestämt eller tillståndsbaserat, se Figur 5.



Figur 5. Schematisk beskrivning av underhållstyper (SIS, 2019).

Avhjälpande underhåll syftar till att möjliggöra att ett objekt kan utföra sin krävda funktion efter att ett feltillstånd upptäcks medan förebyggande underhåll syftar till att minska degradering och sannolikhet för feluppkomster (SIS, 2019). Som benämningarna antyder så kan vi se avhjälpande underhåll som en form av reaktivt underhåll och förebyggande underhåll som proaktivt underhåll. Fumeo, Oneto och Anguita (2015) argumenterar för att avhjälpande underhåll är en kostsam underhållsstrategi eftersom återkommande funktionsfel kan leda till

att direkta kostnader för det felande objektet tillsammans med indirekta kostnader till följd av störningar kan överstiga objektets värde.

Förebyggande underhåll kan generellt beskrivas som antingen förutbestämt där underhåll planeras efter felhistorik alternativt tillståndsbaserat där underhåll planeras efter tillståndsövervakning (Ciocoiu, Siemieniuch, & Hubbard, 2017). Förutbestämt underhåll utgår från att planera underhållet utifrån reduceringen av sannolikheten för funktionsfel. En effekt av denna underhållsstrategi kan istället vara att ett objekt byts ut för att det statistiskt sett är nära ett troligt funktionsfel (Fumeo, Oneto, & Anguita, 2015). Vid tillståndsbaserat underhåll och tillståndsövervakning av objektet kan försämring istället upptäckas innan objektet fallerar och påverkar dess funktion (Hodge, O'Keefe, Weeks, & Moulds, 2015). Tillståndsbaserat underhåll som underhållsstrategi möjliggör att degraderingar i objekt kan upptäckas och korrekta underhållsåtgärder kan vidtas därefter (Fumeo, Oneto, & Anguita, 2015). Av förutbestämt- och tillståndsbaserat underhåll menar Márquez och Schmid (2007) att tillståndsbaserat leder till ett mer kostnadseffektivt underhåll eftersom det tillåter att rikta underhållet mot den felande komponenten.

Hur framgångsrik ett tillståndsbaserat underhåll är kan till stor del bero på valet av kritiska nivåer vid övervakningen men även på övervakningsintervall (Pedregal, García, & Schmid, 2004). Övervakningen av tillståndet i spårväxlar argumenterar Márques, Schmid och Collado (2003a) behöver ske i realtid och genom tillämpningen av statistiska metoder. Tidigare studier på tillståndsbaserad övervakning av Márquez et al. (2003b) samt Márquez, Tercero och Schmid (2007) har försökt att förutse fel i spårväxlar genom att undersöka den kraft som spårväxeln utsätts för under omläggning. Liknande har tillståndsbaserad övervakning testats på bommar vid järnvägsövergångar där Márquez, Pedregal och Roberts (2015) använde omläggningstiden för bommarna för att upptäcka uppkommande funktionsfel. De använde där en ARIMA-modell, en modell för ett autoregressivt integrerat glidande medelvärde, för att skapa en prognos för omläggningstiden och plottade därefter nya mätningar mot prognosen. Om mätningarna översteg en tidigare bestämd kritisk nivå så varnade systemet för ett uppkommande fel. Asada, Roberts och Koseki (2013) menar att en stor del av tillståndsbaserade övervakningssystemen som används idag inte möjliggör att diagnostisera funktionsfel utan snarare visar en indikation på ett onormalt beteende i objektet. De menar vidare att denna typ av övervakningssystem kan fördröja underhållsarbetet eftersom underhållspersonalen inte vet vad funktionsfelet är förrän de anländer på plats. Asada, Roberts och Koseki hävdar därför att ett tillståndsbaserat övervakningssystem bör ge larm för funktionsfel i tidiga skeden men även diagnostisera dem.

2.3 Statistisk processtyrning

Som Márques et al. (2003a) beskriver behöver övervakning av tillståndet i spårväxlar ske i realtid genom statistiska metoder. En vanlig statistisk metod för övervakning av processer i realtid är statistisk processtyrning, som enligt Montgomery (2013) har flera viktiga fördelar. Fördelarna är bland annat att metoden är lätt att använda, har stor påverkan och kan tillämpas på alla typer av processer (Montgomery, 2013). Linderman, McKone-Sweet och Anderson (2005) menar att de viktigaste verktygen för att styra processer är statistisk processtyrning samt underhållsstyrning och att de kan ge ekonomiska fördelar när de används tillsammans.

Statistisk processtyrning används för att reducera processens variation genom att identifiera och eliminera kända orsaker till variation samt för att övervaka processen över tid (Lundkvist, 2015). Statistisk processtyrning består av sju olika verktyg, där styrdiagram är det mest använda eftersom de kan öka produktiviteten, är effektiva för att förebygga fel och kan bidra med information till diagnosticering av processen (Montgomery, 2013). Enligt Lundkvist (2015) är de vanligaste styrdiagrammen Shewhart-, CUSUM- och EWMA-diagram.

Shewhart-diagram är lämpliga vid normalfördelade och oberoende variabeldata och används främst för att kontrollera processens medelvärde samt variation (Montgomery, 2013). Det har en linje som motsvarar medelvärdet och linjer för övre- respektive undre styrgräns (Montgomery, 2013). Eftersom styrgränserna har beräknats då processen anses vara i kontroll så förväntas nästan alla mätvärden som plottas hamna mellan övre och undre styrgränsen (Montgomery, 2013). Situationen när processen anses vara i kontroll kallas för fas 1 och innebär att det bara bör finnas slumpmässig variation i mätvärdena (Montgomery, 2013). Fas 2 är då de beräknade styrgränserna från fas 1 appliceras i styrdiagrammet för att kontrollera om nya insamlade mätvärden är i kontroll (Montgomery, 2013). Montgomery menar vidare att om mätvärden i fas 2 hamnar utanför styrgränserna bör processen kontrolleras för att finna eventuella systematiska fel som kan korrigeras.

Det finns styrdiagram både för grupperade och individuella mätvärden, men enligt Montgomery (2013) finns det ingen anledning att gruppera mätningarna vid automatiskt insamlade data då varje händelse analyseras. Det gäller även då det är långa intervall mellan de mätbara händelserna då gruppering endast skulle fördröja analyserna (Montgomery, 2013). Centrallinje ($\bar{x}$), övre styrgräns (ÖSG), undre styrgräns (USG) för ett individuellt *x*-diagram beräknas med ekvation 1-3 för *n* insamlade mätvärden och standardavvikelse σ^*,

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}, \tag{1}$$

$$\text{Ö}SG \; = \; \bar{x} + 3\sigma^*, \tag{2}$$

$$USG \; = \; \bar{x} - 3\sigma^*. \tag{3}$$

När individuella styrdiagram upprättas är det enligt Montgomery vanligt att skatta processens variation med *Moving Range* (*MR*) som beräknas utifrån två på varandra följande mätvärden enligt ekvation 4,

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}|. \tag{4}$$

Montgomery (2013) menar att det i praktiken är vanligt att skatta σ^* med *MR* enligt ekvation 5,

$$\sigma^* = \frac{\overline{MR}}{d_2}, \tag{5}$$

där d_2 är ett tabellerat värde.

För att se variationen i processen kan även ett *MR*-diagram upprättas med hjälp av styrgränserna i ekvation 6-7,

$$\text{Ö}SG = D_3\overline{MR}, \tag{6}$$

$$USG = D_4\overline{MR}, \tag{7}$$

där D_3 och D_4 är tabellerade värden.

CUSUM och EWMA-diagram är två tidsviktade alternativ till de traditionella Shewhart-diagrammen och är effektiva när gäller att hitta små skift, skift som är mindre än 1.5σ (Montgomery, 2013). Det är dock viktigt att undersöka autokorrelation eftersom det redan vid låg autokorrelation kan vara olämpligt att använda traditionella styrdiagram (Montgomery, 2013), se nästföljande avsnitt.

2.3.1 Autokorrelerade data

Autokorrelation beskrivs som att data är beroende av varandra i tid, vilket innebär att observation på nuvarande data beror på föregående observations data (Lundkvist, 2015). För att mäta i realtid krävs att data insamlas kontinuerligt och frekvent insamlade data tenderar ha högre autokorrelation i kontinuerliga processer (Vanhatalo & Bergquist, 2007). Eftersom autokorrelerade data är beroende av tid kan den beskrivas som icke-slumpmässig (Alwan, 1991). Problemet med vanliga styrdiagram är att larmgränser blir felaktiga om data är autokorrelerad eftersom skattningen av spridningen blir mindre än den verkliga spridningen vilket kan resultera i ett ökat antal falska larm (Montgomery, 2013). Montgomery (2013) beskriver att det därför kan vara lämpligt att analysera data med modeller som bland annat använder styrdiagram för residualer. En annan metod som beskrivs i litteraturen föreslår att justera styrgränserna för att få en önskad falsk alarmfrekvens. Se, till exempel, Rusell, Chiang och Braatz (2000) eller Vanhatalo och Kulachi (2015). Montgomery (2013) menar att en lämplig approach är tidsseriemodeller för att hantera autokorrelerade data, eftersom modellerna tar bort autokorrelationen från data så att styrdiagram kan upprättas på residualerna. För att upptäcka autokorrelation framhäver Alwan (1991) autokorrelationsfunktionen (ACF) som lämplig. ACF kan tillsammans med den partiella autokorrelationsfunktionen (PACF) användas för upprättandet av tidsseriemodeller (Alwan, 1991). Men för att applicera tidsseriemodellerna, vanligtvis ARIMA-modeller, måste autokorrelerade data insamlas på jämnt fördelade tidsintervall (Montgomery, 2013).

3 Metod

Under följande kapitel beskrivs valet av examensarbetets problemlösningsmetod enligt förbättringsprocessen DMAIC. Därefter presenteras datainsamlingen från litteraturstudie och Trafikverkets databaser följt av dataanalysen enligt stegen i DMAIC. Slutligen presenteras avsnitt om rapportens validitet och reliabilitet.

3.1 Problemlösningsmetod

Förbättringsprocessen DMAIC valdes för att besvara syftet och beskrivs av De Mast och Lokkerbol (2012) som en problemlösningsmetod som följer de fem stegen *Define, Measure, Analyse, Improve* och C*ontrol.* De Mast och Lokkerbol beskriver att DMAIC-processen lämpar sig vid problemområden där det saknas rutinmässiga lösningsmetoder. Vi ansåg därav DMAIC-processen som en lämplig metod i examensarbetet för att finna systematiska tillvägagångssätt för hur uppkomsten av tågstörande fel i spårväxlar kan reduceras genom tillståndsbaserat underhåll. Följande avsnitt beskriver stegen *Define, Measure, Analyse, Improve* och *Control* enligt Montgomery (2013).

Under examensarbetet följdes stegen *Define* och *Measure* för att uppnå det första delmålet som innebar att identifiera det tågstörande fel som orsakat flest antal merförseningsminuter per fel. Under steget *Define* identifieras möjligheter med projektet vilket vi gjorde genom att ta fram en problembeskrivning utifrån avsnitt 3.2.1. *Measure*-steget handlar om att utvärdera och förstå nuläget av projektet, varpå vi undersökte databaser och fann att problemområdet kunde brytas ner på komponentnivå. Under *Define* ska projektets potential valideras, men vi ansåg det lämpligast efter *Measure* eftersom vi då kunde bryta ner potentialen till komponentnivå, se besparingspotentialen under avsnitt 4.1.2.

För att uppnå det andra delmålet följdes steget *Analyse* genom att undersöka möjligheten att förutspå identifierat funktionsfel i Delmål 1 genom larm från DS-analys och genom styrdiagram med omläggningstid. *Analyse* handlar enligt Montgomery (2013) om att använda data från *Measure* för att identifiera förhållanden mellan orsak och verkan. Det var därför av intresse att undersöka om det fanns indikationer på att ett funktionsfel på komponentnivå i spårväxeln kan uppstå, innan felet inträffat, för att på så sätt kunna finna orsaken och förhindra att det uppstår.

Slutligen tillämpades stegen *Improve* och *Control* för att uppnå det tredje delmålet att upprätta rekommendationer för hur uppkomsten av funktionsfel fel i spårväxlar kan reduceras. *Improve* handlar om att på ett kreativt sätt komma med förbättringsförslag utifrån den informationen som tolkats och tillgodosetts under tidigare *Measure* och *Analyse.* I *Improve* lyfte vi därför förbättringsförslag både gällande hur styrgränser för larm bör utformas, men även hur insamling av data kan förbättras. *Control* handlar om att slutföra projektet och överlämna det till beställaren med ett förslag för hur processen bör styras för att säkerställa att resultatet av projektet kan implementeras. I *Control* lämnade vi därför rekommendationer hur processen bör styras efter att *Improve* implementerats.

3.2 Datainsamling

Datainsamlingen under examensarbetet har innefattat litteratur- och dokumentstudier samt inhämtning av data från Trafikverkets databaser. Nedan följer beskrivning av respektive moment.

3.2.1 Litteratur- och dokumentstudie

Litteratur- och dokumentstudier genomfördes under steget *Define*. Sökning av existerande litteratur utfördes genom databaserna Scopus, Web of Science samt Google Scholar. Litteraturstudien sammanfattades i ett dokument där sökord, referens och områdesbidrag noterades för att tydliggöra samt visualisera tidigare kunskap inom den existerande litteraturen. Förutom litteratur om underhåll och övervakning av järnvägsinfrastruktur granskade vi även interndokument samt standarder för att få förståelse för området och områdesspecifika begrepp. Interndokument så som rapporter tillhandahölls av Sweco Rail och omfattade tidigare analyser av Trafikverkets data på spårväxlar. Som komplement till litteraturstudien tillhandahöll Sweco Rail SIS-standarder för underhållsterminologi som användes för att förklara standardiserade branschspecifika begrepp vilka även använts i examensarbetet. Resultatet av litteratur- och dokumentstudien i *Define* ämnade agera stöd till *Measure* för att besvara det första delmålet.

3.2.2 Databaser

Under *Measure* har data insamlats från Trafikverkets databaser BIS, Ofelia, LUPP, Bessy samt DS-analys. I Tabell 1 finns databaserna med respektive förklaring. För att möjliggöra återskapande av analyser presenteras även extraherad information.

Tabell 1. Trafikverkets databaser med tillhörande förklaringar.

Databas	Förklaring	Extraherad information
BIS	BIS innehåller information om Trafikverkets banrelaterade anläggningar och kan inkludera information om enskilda komponenter, antal komponenter av en viss typ samt avstånd inom järnvägsnätet (WSP, 2011)	Anläggningsinformation om spårväxlar
Ofelia	Ofelia innehåller registrerade felrapporter av störningar i infrastrukturanläggningar i vilka underhållsentreprenörer rapporterar bland annat felorsak och åtgärd (WSP, 2011). Varje felrapport går att följa från symptom och identifierat fel till den åtgärd som underhållsentreprenören genomfört (WSP, 2011)	Inrapporterade funktionsfel, orsaker, orsaksbeskrivningar och åtgärdsbeskrivningar
LUPP	LUPP används för att ta fram information om punktlighet och störningar i tågtrafiken (Trafikverket, 2018b)	Merförseningar
Bessy	Bessy är Trafikverkets databas för underhålls- och säkerhetsbesiktningar i vilket information om besiktningsanmärkningar noteras (Nissen, 2005)	Besiktningar
DS-analys	DS-analys är en databas som samlar in och presenterar data i form av felrapporter på spårväxlar från Ofelia samt även antal tågpassager, antal omläggningar och omläggningstider på individnivå (Trafikverket, 2012). Informationen som presenteras kan användas som stöd för felavhjälpning av bland annat spårväxlar (Trafikverket, 2012)	Larm, omläggningstider och antal omläggningar

I avsnitten nedan beskrivs databaserna Ofelia samt DS-analys närmare eftersom de är centrala delar i stegen *Measure* och *Analyse* samt även för presenterade rekommendationer och förslag på fortsatta studier. Först följer en beskrivning av Ofelia följt av en beskrivning av DS-analys.

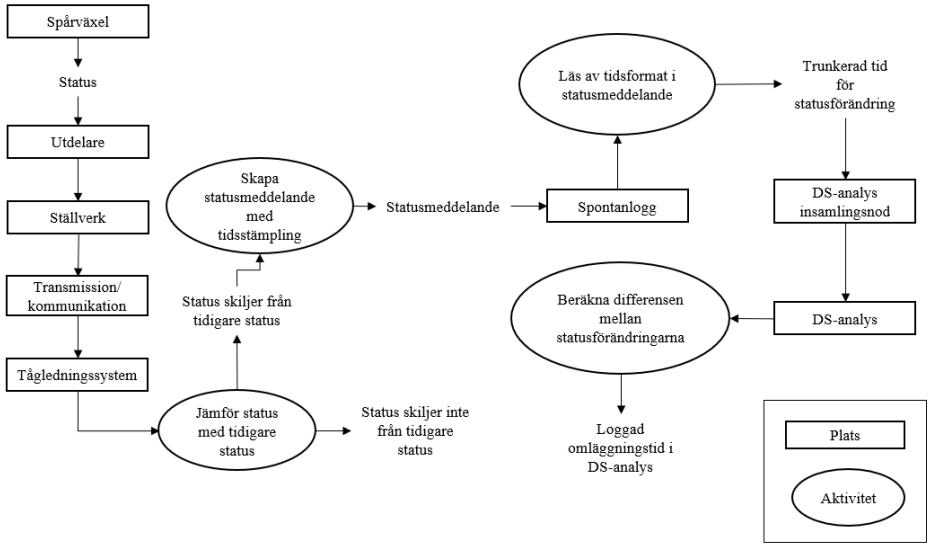
Ofelia

Databasen Ofelia bedömde vi som central för att bryta ner problemområdet på komponentnivå och besvara det första delmålet. Ofelia bedömdes även central eftersom samtliga funktionsfel ska rapporteras in i databasen. Enligt F. Andersson (personlig kommunikation, 23 januari 2019) så rapporteras funktionsfel in manuellt i Ofelia där funktionsfel och orsaker väljs i rullistor och orsaks- och åtgärdsbeskrivningar skrivs i fritext. Data visade att under 2018 saknade 44% av de rapporterade funktionsfelen i Ofelia fritext i orsaks- och åtgärdsbeskrivningen. Ofelia kan dock anses ha kvalitetsbrister då en stor andel funktionsfel har registrerade orsaker som ”ej möjligt att definiera” alternativt ”inget fel” (WSP, 2011).

DS-analys

DS-analys var den databas som var lämplig för att undersöka det andra delmålet. Databasen möjliggjorde en tillståndsbaserad övervakning eftersom data insamlas automatiskt och presenterar nuläget och tillståndet i spårväxlarna i form av bland annat larm och omläggningstid. För att öka vår förståelse för DS-analys kontaktades Jonas Solberg på företaget som tillhandahåller databasen.

J. Solberg (personlig kommunikation, 9 maj 2019) förklarade informationsflödet från spårväxel till DS-analys vilket vi sammanställt i en förenklad bild i Figur 6. Ställverket mottar status från spårväxeln och skickar det via transmissionen till tågledningssystemet. Enligt J. Solberg skapas i tågledningssystemet ett tidsstämplat statusmeddelande som via spontanloggen trunkeras och färdas till DS-analys. Med trunkering innebär att sista värdesiffran utelämnas vilket resulterar i att en omläggningstid på exempelvis 5,6 sekunder skulle trunkeras till 5 sekunder. Han förklarar därefter att DS-analys tolkar statusförändringarna och bedömer om en omläggning genomförts. Bedömningen, menar J. Solberg, görs genom tre statusar. Den första statusen noterar att växeln är i ett läge och nästkommande status noterar att växeln är mellan två lägen. När tredje status inkommer om att växeln är i motsatt läge bedömer DS-analys att en omläggning har genomförts och differensen mellan de två senaste statusförändringarna bedöms som omläggningstiden.



Figur 6. Informationsflöde från spårväxel till DS-analys sammanställd efter personlig kommunikation med J. Solberg.

Databasen presenterar även fem olika typer av larm, se Tabell 2. Larmen och tillhörande förklaringar härstammar från en intern handbok vilken hänvisas till i DS-analys. Enligt J. Solberg (personlig kommunikation, 28 mars 2019) uppkommer enbart några av larmen vid omläggningar. Han menade att *Lång omläggningstid*, *Trög växel* och *Objekt ur kontroll* är de larm som uppkommer vid omläggning medan *Kort-* respektive *Långt bortfall* sällan uppkommer vid omläggningar utan kan ske vid bland annat störningar vid tågpassager. Larmen om bortfall förklarade han uppkommer om spårväxeln bryter mot dess funktion när exempelvis TKK samt kontrollanordning ej är i position. Vidare nämner han att larmet *KB Kort bortfall* inte alltid upptäcks på skärmarna hos driftledningscentralen eftersom larmet kan uppkomma och försvinna snabbt. J. Solberg förklarar vidare att det är upp till den som bevakar skärmarna att avgöra om larmet ska anmälas eller inte. Han förklarar därefter att en hög frekvens av larmet *KB Kort bortfall* inte nödvändigtvis resulterar i en felanmälan. Uppkommer däremot larmet *KB Långt bortfall* menar J. Solberg att en felanmälan skapas av personal på driftledningscentralen.

Tabell 2. Förklaringar av samtliga larmtyper för spårväxlar i DS-analys (Trafikverket, 2012).

Typ av larm	Förklaring
Kort bortfall	Växel tappar kontrollbesked och kontrollbesked återkommer i samma läge inom 10 sekunder
Långt bortfall	Växel tappar kontrollbesked och där kontrollbeskedet återkommer i samma läge inom 30 sekunder
Lång omläggningstid	Tiden för omläggning överskrider angiven tid. Larmet är begränsat till 3600 sekunder
Objekt ur kontroll	Växel har haft ogiltig status mer än tillåten tid
Trög växel	Växel ur kontroll och åter i kontroll efter manuell manöver av operatör

Larmet *Lång omläggningstid* skapas enligt förklaringen i Tabell 2 när omläggningen tar längre än angiven tid. Längre än angiven tid menar J. Solberg (personlig kommunikation, 28 mars 2019) bestäms på varje spårväxelindivid och beräknas från medelomläggningstiden under en månad plus två till tre sekunder. Som förklarat i Figur 6 trunkeras omläggningstiden vid spontanloggen.

Larmet *Objekt ur kontroll* inträder när spårväxeln har haft ogiltig status i mer än tillåten tid. Vad som är tillåten tid förklarar J. Solberg (personlig kommunikation, 28 mars 2019) bestäms centralt och bestäms till omkring 12-15 sekunder. Larmet, menar J. Solberg, träder i kraft i samtliga lägen som ställverket tappar kontroll av spårväxeln. Vad som menas med ogiltig status förklarar J. Solberg är när spårväxeln hamnar mellan höger- och vänsterläge alternativt när spårväxeln går tillbaka till ursprungligt läge.

Larmet *Trög växel* kan skapas till följd av att spårväxeln inte kommer i tilltänkt läge. Larmet skapas efter att larmet *Objekt ur kontroll* registrerats samt efter att kommandon skickats för att manuellt lägga om spårväxeln. J. Solberg (personlig kommunikation, 28 mars 2019) menar att

larmet är skapat för att upptäcka funktionsfel i spårväxeln och således hänger ihop med driftstörningar.

3.2.3 Dataanalys

I *Define* analyserades existerande litteratur vilket bidrog till problembeskrivningen och möjliggjorde beräkningen av besparingspotentialen. När data analyserades i *Measure* användes datorverktyget Power BI då det möjliggjorde analys av data från samtliga databaser tillsammans. Databaserna Ofelia och LUPP användes för att finna de orsakskategorier som hade störst potential att minska antalet merförseningsminuter. Se Tabell 3 för vilken data som använts från respektive databas.

Tabell 3. Databaser och extraherade data använd vid delmål 1.

BIS	Ofelia	LUPP
Anläggningsinformation	Funktionsfel, orsaker, orsaks- & åtgärdsbeskrivningar	Merförseningar

För att identifiera de tågstörande felen som lett till flest merförseningsminuter genomfördes en riskanalys. Enligt Woodward och Pitbaldo (2010) genomförs riskanalys bland annat genom stegen riskidentifiering, frekvensanalys, konsekvensbedömning och riskbedömning. I vårt fall var den identifierade risken att funktionsfel leder till merförseningar och således blir tågstörande fel. Frekvensanalysen bedömde vi efter antal gånger en orsak rapporterats i Ofelia och som samtidigt föranlett till en merförsening. Vid konsekvensbedömningen utgick vi från antalet merförseningsminuter per tågstörande fel vilket således gav en indikation på konsekvensen för ett tågstörande fel av den orsakskategorin. Riskbedömningen innefattade valet av funktionsfel. Efter riskanalysen undersöktes orsaks- och åtgärdsbeskrivningar för de orsakskategorier som hade störst potential med avsikt att undersöka vilka komponenter som föranlett de tågstörande felen. I tabellform gjordes ytterligare en konsekvensbedömning på respektive felande komponent med avsikt att finna den komponent som hade flest antal merförseningsminuter per tågstörande fel.

I *Analyse* är det viktigt att förstå orsakerna till variationen i processen (Montgomery, 2013). I vårt fall bedömde vi processen som en växelomläggning och variationen som de orsaker som föranledde funktionsfelen. Under detta steg undersöktes de spårväxlar som haft funktionsfel i samma typ av komponent via Ofelia. De spårväxlar som fanns i DS-analys kunde därefter analyseras visuellt i grafer bestående av antal funktionsfel och antal larm. Analysen byggde på att undersöka om larm från DS-analys uppstått i ett speciellt mönster innan funktionsfelet inträffat. För de analyserade spårväxlarna undersöktes Bessy för att se om externa orsaker så som besiktningar kunde ha utlöst funktionsfelen. Se Tabell 4 för extraherade data ur Bessy och DS-analys. För att säkerställa att förutsättningarna för larm funnits undersökte vi även om det skett omläggningar tiden innan funktionsfelet inträffade. Detta gjordes eftersom ett villkor för att flertalet av larmen beskrivna i Tabell 2 är att det skett en omläggning.

Tabell 4. Databaser och extraherade data använd vid delmål 2a.

Bessy	DS-analys
Besiktningar	Larm, antal omläggningar

Därefter undersökte vi om styrdiagram baserade på omläggningstid hade kunnat förutse det identifierade funktionsfelet. Styrdiagram från statistisk processtyrning valdes av anledningen att Montgomery (2013) beskriver metoden som en vanlig statistisk metod vid övervakning av processer i realtid. Data från DS-analys som kunde analyseras med statistisk processtyrning var tiden för individuella omläggningar, se Tabell 5.

Tabell 5. Databaser och extraherade data använd vid delmål 2b.

DS-analys	Ofelia
Omläggningstid	Funktionsfel

För att beräkna lämpliga larmgränser undersökte vi om det fanns autokorrelation i data, eftersom det enligt Montgomery (2013) redan vid låg autokorrelation är olämpligt att använda traditionella styrdiagram. Vid undersökning av autokorrelation tillämpades en signifikansnivå på 5%. Shewhart-diagram upprättades därefter för att analysera om larm skulle ha genererats innan funktionsfelet inträffat. Vidare undersöktes eventuella förändringar i omläggningstiden grafiskt. För de spårväxlar som hade ett stort antal omläggningar kunde vi inte urskilja några förändringar eller skiften. Istället undersöktes medelvärde för omläggningstiderna i grupper om tio på varandra följande omläggningar. Medelvärdet i grupper om tio omläggningar gjorde att den grafiska upplösningen blev tydligare och mönster kunde urskiljas. Hos de spårväxlar som hade ett lågt antal omläggningar analyserades den faktiska omläggningstiden eftersom analys genom medelvärde gav för få värden för att grafiskt se förändringar eller skift.

3.3 Validitet

Under examensarbetet har validiteten undersökts genom samtliga skeden. Validitet kan beskrivas som kopplingen mellan data och verkligheten (David & Sutton, 2011). Den kan delas in i extern validitet som beskriver hur väl data kan spegla en större population genom generalisering samt intern validitet som beskriver hur väl data speglar verkligheten i den aktuella fallstudien (David & Sutton, 2011).

Beslutet att undersöka spårväxlar i Region Öst och slutligen ett mindre antal växelindivider kunde anses försvåra möjligheterna att generalisera resultatet över den totala spårväxelpopulationen i Sverige. När fokus ligger på en mindre population menar David och Sutton (2011) att det kan ha negativ påverkan på den externa validiteten. Trots det ansåg vi att den mindre populationen möjliggjorde användandet av autogenererade data vilket var en förutsättning för ett tillståndsbaserat underhåll. Valet att fokusera på en mindre population spårväxlar ansågs dessutom möjliggöra djupare analyser av verkliga samband mellan larm och funktionsstörande fel. Med avsikt att stärka generaliserbarheten presenterades framtagandet av styrdiagram från statistisk processtyrning vilka kunde tillämpas på andra spårväxlar med DS-analys.

I avseende på den interna validiteten uppmärksammades begränsningar i DS-analys i form av trunkering. Eftersom trunkerade värden nödvändigtvis inte återspeglar verkligheten kan de ses som en form av förenkling. Fastän vi ansåg att trunkeringen var problematisk var DS-analys den databas som kunde tillhandahålla data för omläggningstider vilket var centralt för att svara på examensarbetets syfte.

3.4 Reliabilitet

Reliabiliteten kan beskrivas som i vilken grad ett resultat eller test är konsistent över tid (David & Sutton, 2011). Med hänsyn till reliabiliteten i examensarbetet behövde datakvaliteten tas i beaktning. Databaser som DS-analys bedömde vi ha god datakvalitet i avseende på reliabilitet eftersom indata loggas automatiskt i systemet. Dock ansåg vi att datakvaliteten i databaser som Ofelia och Bessy hade begränsningar i avseende på reliabilitet eftersom delar av innehållet i databasen rapporteras in genom fritext av underhållspersonal vilket kan öka risken att inrapportering av samma typ av funktionsfel ser annorlunda ut i databaserna. Detta har även påpekats i rapporten av WSP (2011). Andra begränsningar i avseende på databaserna antog vi även kunna kopplas till att kunskap hos underhållspersonal kan variera från person till person vilket riskerar att bedömningar görs annorlunda från fall till fall trots att funktionsfelet är detsamma. David och Sutton (2011) beskriver metoder som *test-retest* metoden för att bedöma reliabiliteten där undersökningspersonen får utföra samma test vid olika tillfällen. Denna metod ansåg vi dock inte var möjlig under examensarbetet eftersom tidigare registrerade och åtgärdade funktionsfel analyserades.

Med avsikt att stärka reliabiliteten noterades vilken data som har extraherats från respektive databas under dataanalysen. Det ansågs skapa transparens vid analysen samtidigt som det möjliggör framtida återupprepande av studiens analys. En ytterligare handling med avsikt att stärka reliabiliteten var användningen av begrepp och tillhörande definitioner. För att förebygga risken för missuppfattningar till följd av syftningsfel, både internt och externt, användes därför branschspecifika standarder.

4 Fallstudie – DMAIC

Resultatet från fallstudiens tre delmål presenteras nedan. Respektive delmåls resultat förklaras genom dess tillhörande DMAIC-steg och analyseras löpande. Tillsammans representerar de tre delmålen hela DMAIC-processen. Kapitlet avslutas med en presentation av rekommendationer för hur uppkomsten av funktionsfel kan reduceras.

4.1 Delmål 1: Identifiera funktionsfel

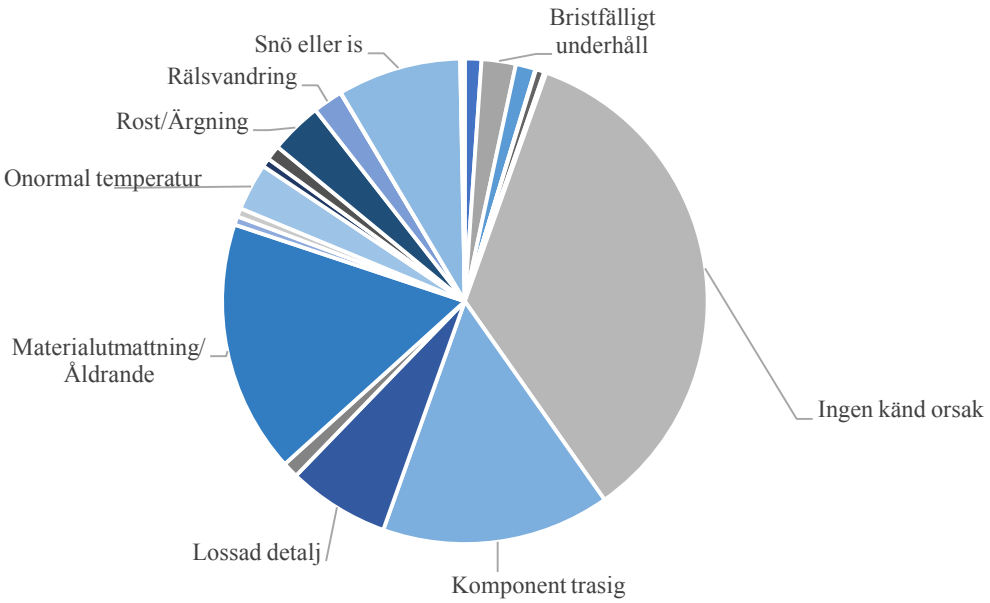
Avsnittet presenterar resultatet från *Define* och *Measure* för att identifiera funktionsfel som orsakat flest antal merförseningsminuter per fel. Steget *Define* sammanfattar problemdiskussionen med tillhörande syfte och delmål medan *Measure* identifierar vilken typ av tågstörande fel som har störst besparingspotential.

4.1.1 Define

Eftersatt underhåll är ett stort problem på järnvägen eftersom det blir svårt att uppfylla de krav som finns gällande både säkerhet och tillgänglighet. Det eftersatta underhållet leder till felande komponenter och förutom att tillgängligheten påverkas negativt så är de direkta kostnaderna till följd av det akuta avhjälpande underhållet höga. Det avhjälpande underhållet leder även till höga indirekta kostnader till följd av merförseningar i tågtrafiken, vilka hade kunnat reduceras om det fanns sätt att förebygga uppkomsten av funktionsfel. Det finns dock nackdelar med förebyggande underhåll, bland annat att komponenter byts ut för tidigt vilket leder till högre direkta kostnader. För att frångå det problemet är tillståndsbaserat underhåll ett alternativ, vilket innebär att komponenter underhålls först efter en bedömning av deras tillstånd har genomförts. Syftet blev därför att presentera rekommendationer för hur uppkomsten av tågstörande fel i spårväxlar kan reduceras genom tillståndsbaserat underhåll. För att uppfylla syftet bestämde vi att identifiera vilka funktionsfel i spårväxlar som orsakat flest antal merförseningsminuter per fel. Därefter undersökte vi möjligheten att förutspå identifierat funktionsfel genom larm från Trafikverkets befintliga databas DS-analys samt genom styrdiagram från statistisk processtyrning baserat på omläggningstid. Resultatet ledde till rekommendationer för hur uppkomsten av funktionsfel i spårväxlar kan reduceras.

4.1.2 Measure

När funktionsfel registreras i Ofelia rapporteras även misstänkt orsak till felet, och orsaksfördelningen av funktionsfel i spårväxlar under 2018 illustreras i Figur 7 nedan. Den största kategorin var *Ingen känd orsak* men eftersom kategorin saknar överskådlig information om vad som föranlett det funktionsfelet så bedömdes kategorin olämplig att analysera. Orsakskategorier med färre än 700 merförseningsminuter är inte namngivna i Figur 7 nedan eftersom de har liten potential jämfört med övriga orsakskategorier.



Figur 7. Orsaksfördelning av merförseningsminuter till följd av spårväxelfel.

I Tabell 6 presenteras riskanalysen för antal tågstörande fel, antal merförseningsminuter och merförseningsminuter per tågstörande fel för respektive orsakskategori i fallande ordning. Endast de namngivna orsakskategorierna från Figur 7 presenteras i Tabell 6 . Sett till flest antal merförseningsminuter per tågstörande fel var *Rälsvandring, Bristfälligt underhåll* och *Lossad detalj* de största orsakskategorierna, men samtliga hade få tågstörande fel i förhållande till det totala antalet tågstörande fel. Få tågstörande fel gör att de totala merförseningsminuterna blir låg för orsakskategorierna, och därför ansåg vi att den totala förbättringspotentialen blev för låg. Förutom att den totala förbättringspotentialen blir låg finns det en risk att få tågstörande fel leder till ett för litet underlag att analysera i Delmål 2. *Komponent trasig, Materialutmattning/Åldrande, Onormal temperatur, Snö eller is* och *Rost/Ärgning* var de nästföljande orsakskategorierna med flest merförseningsminuter per tågstörande fel. De som hade hög frekvens på antal tågstörande fel och även flest merförseningsminuter per tågstörande fel var *Komponent trasig* och *Materialutmattning /Åldrande*. *Snö eller is* och *Rost/Ärgning* hade hög frekvens på antal tågstörande fel men vi ansåg att förbättringspotentialen var för låg till följd av få merförseningsminuter per tågstörande fel.

Tabell 6. Frekvens och merförsening per orsakskategori i spårväxlar.

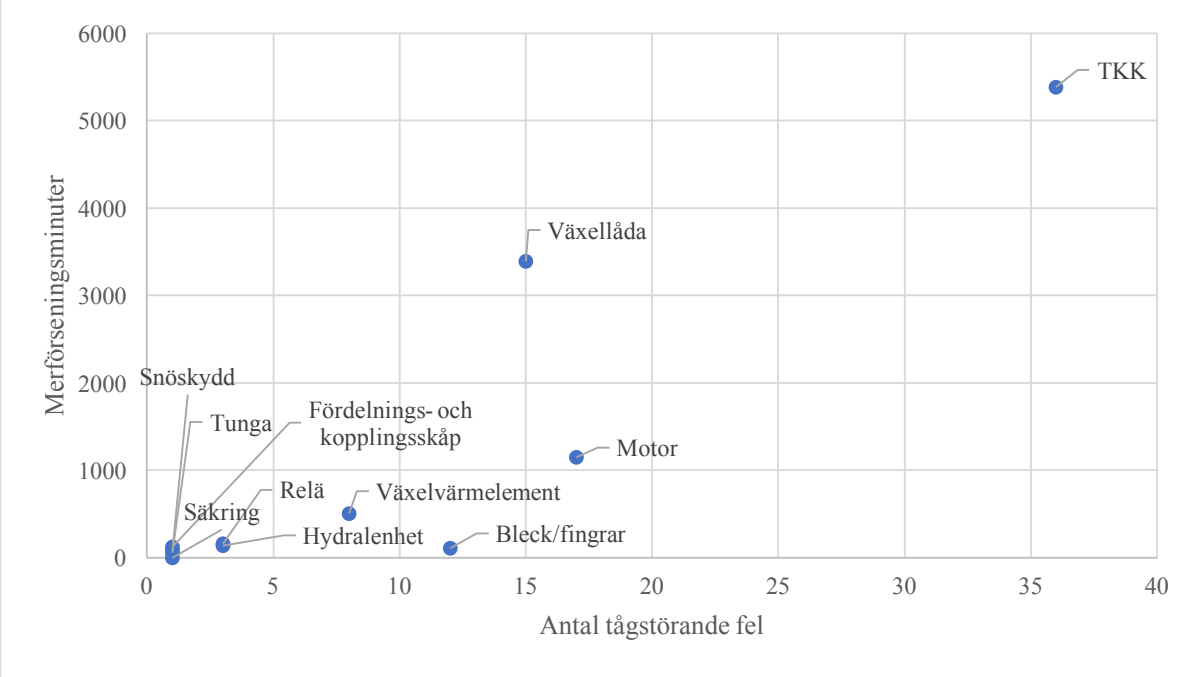
Orsak	Tågstörande fel	Merförseningsminuter	Merförseningsminuter per tågstörande fel
Rälsvandring	3	1 260	420,0
Bristfälligt underhåll	10	1 440	144,0
Lossad detalj	51	4 287	84,1
Komponent trasig	171	9 614	56,2
Materialutmattning/Åldrande	229	10 622	46,4
Onormal temperatur	73	1 986	27,2
Snö eller is	216	5 198	24,1
Rost/Ärgning	144	2 193	15,2

Komponent trasig hade hög frekvens av tågstörande fel och stor påverkan per tågstörande fel, men *Materialutmattning/Åldrande* hade högst frekvens och nästan lika stor påverkan per tågstörande fel relativt *Komponent trasig*. *Materialutmattning/Åldrande* hade dessutom flest antal merförseningsminuter. Detta skapade svårighet att prioritera en av dessa två kategorier vilket gjorde att vi valde att undersöka båda kategorierna.

Därefter gjorde vi en översyn av orsaks- och åtgärdsbeskrivning i varje händelse som lett till tågstörande fel för *Komponent trasig* och *Materialutmattning/Åldrande.* I orsaks- och åtgärdsbeskrivning från Ofelia har funktionsfel kopplats till en specifik komponent i spårväxeln. Det framgick att kategoriernas beskrivningar i stor utsträckning omfattade samma komponenter, vilket föranledde till djupare analys av båda. De händelser ur respektive orsakskategori som inte haft ifyllda orsaks- eller åtgärdsbeskrivningar i Ofelia exkluderade vi på grund av att händelserna inte kunde kopplas till en specifik komponent. För

Materialutmattning/Åldrande innebar detta att 156 tågstörande fel, motsvarande 68%, exkluderades och för *Komponent trasig* exkluderades 115 tågstörande fel, motsvarande 67%. Det innebär att nästan 70% av de rapporterade tågstörande felen i *Komponent trasig* och *Materialutmattning/Åldrande* saknade orsaks- eller åtgärdsbeskrivningar, vilket kan jämföras med att 44% av samtliga rapporterade funktionsfel i Ofelia saknade åtgärds- eller orsaksbeskrivning under 2018.

Eftersom både *Materialutmattning/Åldrande* och *Komponent trasig* hade liknande orsaks- och åtgärdsbeskrivningar ansåg vi att det fanns svårigheter med att urskilja vilken orsakskategori som underhållspersonal bör registrera vid varje nytt tågstörande fel. Detta resonemang ansåg vi gav oss grund till att analysera båda orsakskategorierna tillsammans eftersom kategorierna kunde vara svåra att skilja från varandra. En sammanslagning av båda orsakskategorierna finns i Figur 8.



Figur 8. Antal tågstörande fel och merförseningsminuter av både Materialutmattning/Åldrande och Komponent trasig per komponent.

Ur Figur 8 valdes den typ av tågstörande fel i spårväxlar som orsakat flest antal merförseningsminuter per tågstörande fel. Tabell 7 visar komponenterna med de ackumulerade merförseningsminuterna och antalet tågstörande fel samt merförseningsminut per tågstörande fel. Tågstörande fel som inte hade registrerade orsaks- eller åtgärdsbeskrivningar har enligt tidigare beskrivning exkluderats. *Växellåda* var den komponent som hade störst förbättringspotential då den resulterat i flest antal merförseningsminuter per tågstörande fel. Förhindrandet av ett tågstörande fel i *Växellåda* kunde därför leda till störst besparing jämfört med övriga komponenter i Tabell 7. Förutom det bedömde vi att det fanns tillräckligt stort underlag för jämförelse och analys i Delmål 2 samt att de totala merförseningsminuterna visade på stor besparingspotential. Men eftersom ungefär 70% av orsaks- och åtgärdsbeskrivningarna saknades fanns en stor andel tågstörande fel som inte kunde härledas till specifika komponenter. Det skulle potentiellt kunna innebära att det fanns tågstörande fel i andra komponenter som var större än *Växellåda* till antalet merförseningsminuter. Men på grund av bortfallet kunde det varken bekräftas eller förkastas. Vi identifierade därför *Växellåda* som den typ av tågstörande fel i spårväxlar som orsakat flest antal merförseningsminuter per tågstörande fel.

Tabell 7. Merförseningsminuter och antalet tågstörande per komponent.

Komponenter	Tågstörande fel	Merförseningsminuter	Merförseningsminuter per tågstörande fel
Växellåda	15	3 391	226,1
TKK	36	5 380	149,4
Fördelnings- och kopplingsskåp	1	127	127,0
Snöskydd	1	86	86,0
Motor	17	1 148	67,5
Växelvärmelement	8	506	63,3
Tunga	1	61	61,0
Relä	3	161	53,7
Hydralenhet	3	139	46,3
Bleck/Fingrar	12	106	8,8
Säkring	1	1	1,0
Totalt	104	11 617	

Besparingspotential

Från de utvalda orsakskategorierna i analysen kunde besparingspotentialen beräknas genom kostnad per merförseningsminut multiplicerat med antalet merförseningsminuter. Enligt Nissen (2009, s.34) uppskattas kostnaden till 80 €/förseningsminut. Med aktuell valutakurs

motsvarar därför en merförseningsminut ungefär 838 SEK (Valuta.se, 2019-02-18). I en intern utredning hos Sweco Rail har förseningar till följd av spårväxelfel uppskattats kosta samhället ca 600 miljoner SEK per år. Under 2018 ackumulerades 227 965 merförseningsminuter i Sverige till följd av spårväxelfel, vilket skulle innebära att varje merförseningsminut motsvarar en kostnad på 2 632 SEK. Nissens (2009) uppskattning av kostnad per förseningsminut är därför förmodligen lågt beräknat, och besparingspotentialen som presenteras är troligtvis lägre än den verkliga besparingen.

Under 2018 bidrog *Materialutmattning/Åldrande* med 10 622 merförseningsminuter och *Komponent trasig* med 9 614 merförseningsminuter i Region Öst vilket totalt motsvarar 20 236 merförseningsminuter. Utifrån de uppskattade kostnaderna per förseningsminut och resultatet av analysen kunde en potentiell besparing för orsakskategorierna *Materialutmattning/Åldrande* samt *Komponent trasig* finnas i intervallet:

$$BP_{Total} = [838 * 20\,236;\ 2\,632 * 20\,236] = [16\,957\,768;\ 53\,261\,152].$$

Den felande komponenten *Växellåda* hade åtgärds- och orsaksbeskrivningar motsvarande 3 391 merförseningsminuter under 2018 vilket skulle innebära en besparingspotential i intervallet:

$$BP_{Växellåda} = [838 * 3\,391;\ 2\,632 * 3\,391] = [2\,841\,658;\ 8\,925\,112].$$

Eftersom en stor andel merförseningsminuter var resultat av tågstörande fel som inte hade åtgärds- och orsaksbeskrivningar togs de inte med i ovan beräkningar. *Växellåda* hade 3 391 merförseningsminuter av totalt 11 617 merförseningsminuter för tågstörande fel med åtgärds- eller orsaksbeskrivning, vilket motsvarade 29,2%. Om vi antog att *Växellåda* stod för 29,2% av merförseningsminuter hos de händelser som saknade åtgärds- och orsaksbeskrivning så motsvarade det 5 907 merförseningsminuter för *Växellåda*, vilket skulle ge besparingspotential i intervallet:

$$BP_{Alla\ Växellåda} = [838 * 5907;\ 2\,632 * 5907] = [4\,950\,066;\ 15\,547\,224].$$

Utöver den samhällsekonomiska besparingspotentialen tillkommer även materialkostnader för den felande komponenten *Växellåda*. Kostnaden per enhet för komponenten *Växellåda* i analyserade spårväxelmodeller uppgår till ungefär 30 000 SEK (F. Andersson, personlig kommunikation, 28 maj 2019).

4.2 Delmål 2: Undersök möjlighet att förutspå identifierat funktionsfel

Avsnittet presenterar resultatet från *Analyse*. Delmål 2a avser att undersöka möjligheten att förutspå funktionsfel i *Växellåda* från Delmål 1 genom larm från Trafikverkets befintliga databas DS-analys. Delmål 2b avser att undersöka möjligheten att förutspå funktionsfel i *Växellåda* från Delmål 1 genom styrdiagram från statistisk processtyrning baserade på omläggningstid.

4.2.1 Analyse

Under *Measure* identifierades 15 funktionsfel med merförsening som kopplades till komponent *Växellåda,* se Tabell 7 i föregående avsnitt. De spårväxelindivider som dessa funktionsfel kom från samkördes mot databasen DS-analys. Denna samkörning visade att enbart åtta spårväxlar fanns med i DS-analys, varpå vi undersökte om det fanns liknande funktionsfel som registrerats i en annan orsakskategori i Ofelia. Då felavhjälpning rapporteras in manuellt i Ofelia kan val av orsakskategori skilja sig mellan underhållsentreprenörer, trots att det kan röra sig om samma typ av funktionsfel. Eftersom inrapportering i Ofelia visade sig vara bristfällig i form av bortfall och användningen av orsakskategorier undersöktes samtliga inrapporterade funktionsfel under 2018 med åtgärds- eller orsaksbeskrivning. Detta gjordes för att fånga upp funktionsfel i *Växellåda* som rapporterats under andra orsakskategorier. Sökning gjordes på orden ”växellåda”, ”växel låda”, ”vxllåda”, ”vxl låda” eftersom de orden återkommit i de andra orsaks- och åtgärdsbeskrivningarna. Det resulterade i ytterligare fem funktionsfel på spårväxlar som även fanns i DS-analys. Orsaks- och åtgärdsbeskrivningar för de totalt 13 spårväxlarna återfinns i Bilaga A. Vi valde därför att analysera dessa 13 spårväxlar under Delmål 2a respektive 2b.

Delmål 2a: Möjlighet att förutspå funktionsfel i Växellåda genom DS-analys

Den första delen av *Analyse* ämnade att undersöka möjligheten att förutspå funktionsfelen i de 13 spårväxlarna genom larm i DS-analys. Tabell 8 visar respektive spårväxel samt om DS-analys registrerat någon av larmtyperna inom en månad från att funktionsfelen registrerades i Ofelia. Vi ansåg att eventuella larm borde ha börjat visa sig en månad innan funktionsfelet inträffat och därför valde vi att undersöka data från 30 dagar innan funktionsfelet inträffade. Det innebar att vi kunde analysera larm som inträffat i närtid till att funktionsfelet i *Växellåda* uppstod. Larmtyperna *KB Kort bortfall* och *KB Långt* bortfall exkluderades på grund av att de sällan uppkommer vid omläggningar utan till följd av störningar vid exempelvis tågpassager.

Tabell 8. Spårväxlar med tillhörande larm inom en månad från funktionsfel.

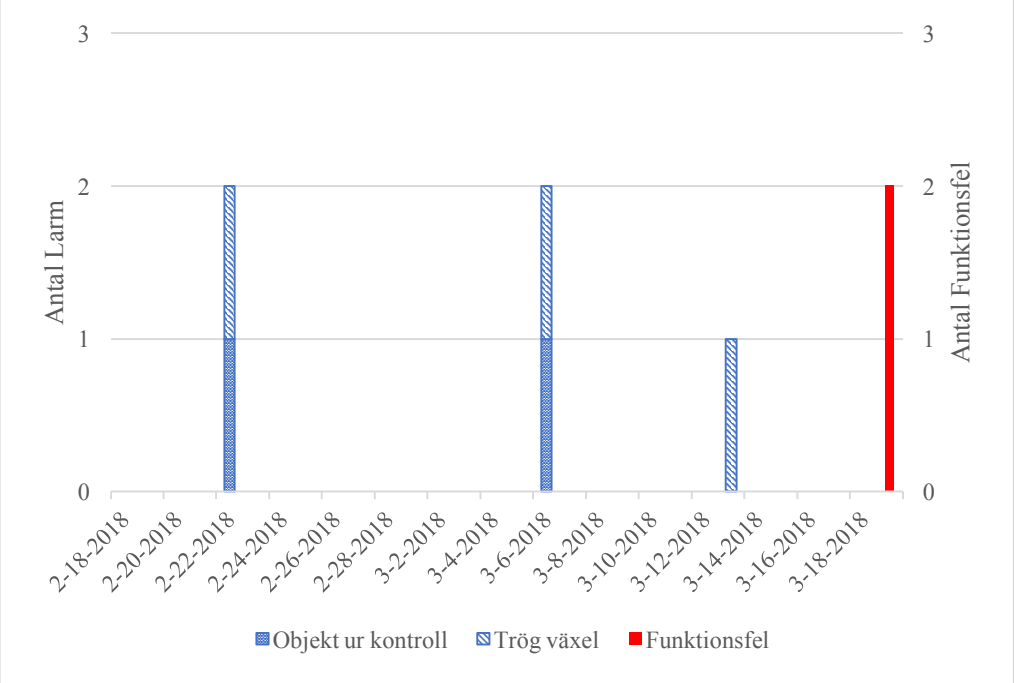
Spårväxel	Objekt ur kontroll	Trög växel	Lång omläggningstid	Larm innan funktionsfel
Bål 113	Nej	Nej	Nej	Nej
Cst 421a	Ja	Nej	Nej	Ja
Cst 554b	Ja	Nej	Nej	Ja
Cst 581a	Ja	Ja	Nej	Ja
Duo 131a	Nej	Nej	Nej	Nej
Ep 131	Nej	Nej	Ja	Ja
Gn 132	Nej	Nej	Nej	Nej
Ke 148a	Nej	Nej	Nej	Nej
Kmy 103	Ja	Ja	Nej	Ja
Lub 132	Nej	Nej	Nej	Nej
Skby 122	Nej	Nej	Nej	Nej
So 1130	Ja	Ja	Nej	Ja
Äs 724a	Ja	Nej	Ja	Ja

Larm från DS-analys som registrerades samma dag som funktionsfel exkluderades från analysen. Exkluderingen gjordes eftersom vi noterade att antalet larm kraftigt ökade efter att funktionsfelet inträffat vilket delvis är en följd av att operatörerna manuellt försökt återfå spårväxeln i kontroll. Vi ansåg att antalet larm som inträffat samma dag som funktionsfelet var missvisande då majoriteten i själva verket uppkommit efter funktionsfelets uppkomst. Larm från månaden innan funktionsfelet identifierades i 7 av de 13 spårväxlarna.

För att säkerställa att förutsättningar för larm har funnits har vi kontrollerat att omläggningar har skett under månaden innan funktionsfelet i *Växellåda* registrerats, se Bilaga B. Därefter analyserade vi visuellt de sju spårväxlarna som visat uppkomst av larm, samtliga figurer återfinns i Bilaga B. I de fyra spårväxlarna Cst 554b, Cst 581a, So 1130 och Äs 724a noterades flertalet funktionsfel där samtliga hade funktionsfel i *Växeldrivsmotor* inom 30 dagar innan funktionsfelet i *Växellåda*. Enligt Trafikverkssolan (2012) ska friktionskopplingen skydda *Växellåda* genom att slå av strömmen i motorn om växeln inte kan genomföra en omläggning. Trots detta verkar funktionsfelen i *Växellåda* i fyra av fallen ha föregåtts av funktionsfel i *Växeldrivsmotor*. Eftersom båda komponenterna återfinns i omläggningsanordningen kunde vi inte utesluta ett samband mellan funktionsfelen i *Växellåda* och *Växeldrivsmotor*. Samtliga fyra

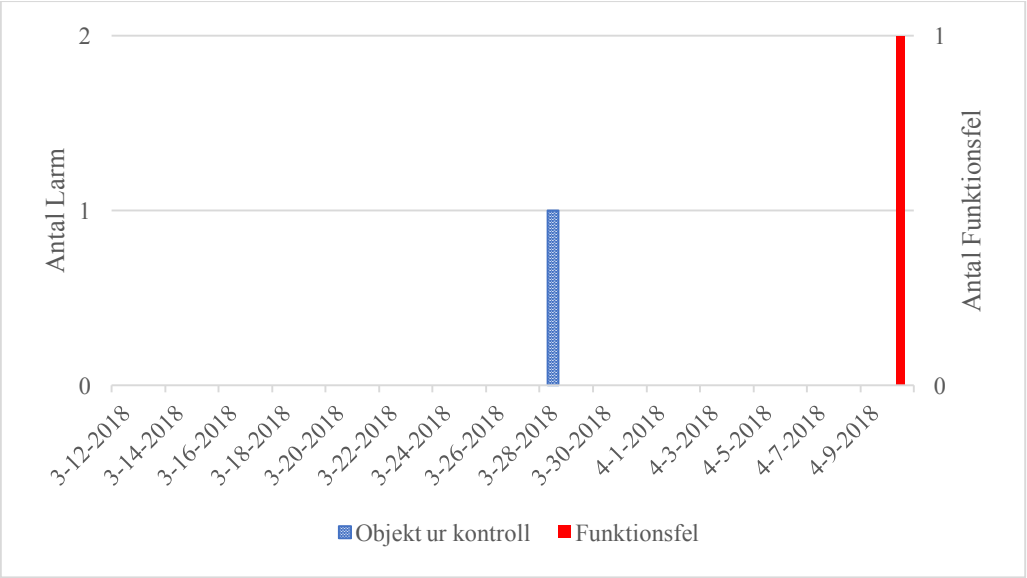
spårväxlar noterade larmen av typen *Objekt ur kontroll* och *Trög växel* både en till två veckor innan funktionsfelet i *Växellåda*, samt även dagarna innan funktionsfelet. Däremot ansåg vi att det fortfarande fanns svårigheter att avgöra vilket av funktionsfelen som orsakat de registrerade larmen.

Kmy 103 hade samma dag som funktionsfelet i *Växellåda* även ett ytterligare funktionsfel orsakat av ett främmande föremål mellan stödräl och växeltunga. Vi ansåg att ett främmande föremål bör vara en plötslig och yttre händelse och enligt Ofelia orsakade funktionsfelet dålig kontakt vid TKK. Vi ansåg att funktionsfelet inte bör ha orsakat larmen tidigare under månaden eftersom omläggningar har genomförts och funktionsfelet till följd av det främmande föremålet antagligen uppkom hastigt. Vi förutsatte därför att larmen kunde bero på funktionsfelet i *Växellåda.* I Figur 9 noterade vi likt tidigare spårväxlar larmen *Objekt ur kontroll* och *Trög växel.*



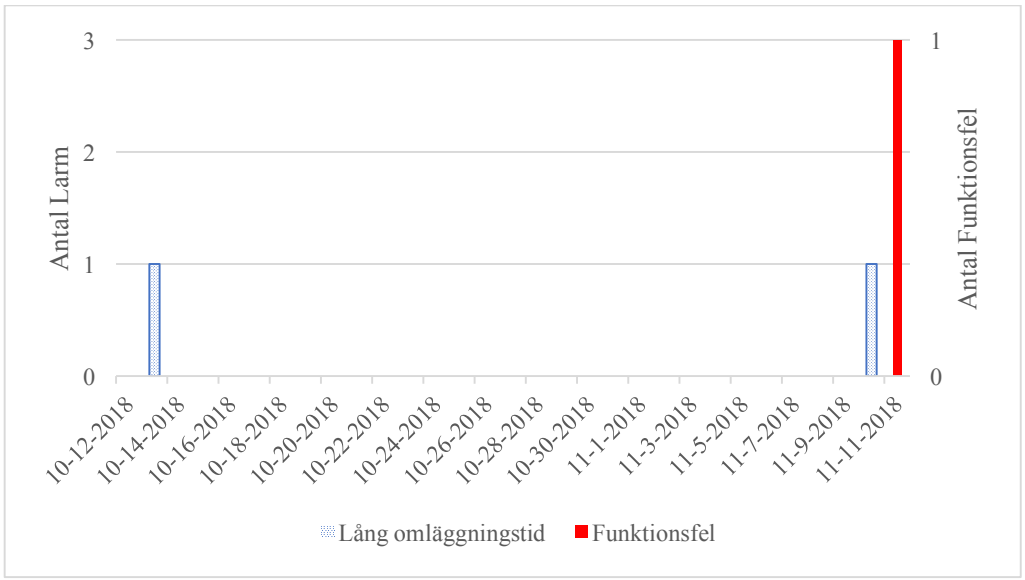
Figur 9. Kmy 103 larm i DS-analys 30 dagar innan funktionsfel i Växellåda.

Spårväxlarna Cst 421a och Ep 131 hade enbart registrerat funktionsfel i *Växellåda*. I dessa fall ansåg vi därför att det bör varit funktionsfelet i *Växellåda* som orsakat larmen. I Figur 10 visas registrerade larm i Cst 421a. Vi noterade att enbart ett larm av typen *Objekt ur kontroll* hade registrerats.



Figur 10. Cst 421a larm i DS-analys 30 dagar innan funktionsfel i Växellåda.

I spårväxel Ep 131 hade två larm av typen *Lång omläggningstid* noterats inom 30 dagar från funktionsfelet i *Växellåda, se* Figur 11. Således larmade DS-analys om att omläggningstiden stigit utanför tillåtna värden vid två tillfällen.



Figur 11. Ep 131 larm i DS-analys 30 dagar innan funktionsfel i Växellåda.

Utifrån underlaget från dessa 13 spårväxlar bedömde vi det svårt att avgöra om larmen i DS-analys hade kunnat ge en indikation på att funktionsfel kopplat till komponenten *Växellåda* skulle inträffa. Dels på grund av att enbart 7 av 13 spårväxlar fått larm i DS-analys och dels på grund av att flera av dessa 7 spårväxlar uppvisat fler än ett funktionsfel. Något som noterades var att larmet *Objekt ur kontroll* uppkommit innan sex av funktionsfelen i *Växellåda* men på grund av att flera funktionsfel också registrerats var det svårt att avgöra vilket funktionsfel som

kan ha orsakat larmen. Därefter noterades larmet *Lång omläggningstid* enbart i två spårväxlar vilket kan ses som att ingen ökning i omläggningstid har noterats hos övriga spårväxlar av DS-analys. Enligt beskrivet av J. Solberg beräknas larmet för *Lång omläggningstid* som medelvärdet av omläggningstiden för spårväxeln under en månad plus två till tre sekunder. Eftersom larmvillkoret i DS-analys beräknas efter spårväxelns medelvärde av omläggningstiden under den senaste månaden kan eventuella kontinuerliga skift tas med i beräkningen. Larmet *Lång omläggningstid* kan därför inte upptäcka kontinuerliga förändringar utan enbart enstaka omläggningstider som avviker markant från medelvärdet.

Fortsättningsvis har flera av funktionsfelen i spårväxlarna rapporterats som *Materialutmattning/Åldrande.* Samtidigt hade flera funktionsfel rapporterats som orsakskategori *Komponent trasig*. Vi uppfattade en problematik med att separera de två olika orsakskategorierna då vi ansåg att *Materialutmattning/Åldrande* kunde ses som en orsak medan *Komponent trasig* snarare beskrev resultatet av en orsak. Orsakskategorin *Komponent trasig* ansåg vi exempelvis kunna vara ett resultat från materialutmattning eller åldrande. *Materialutmattning/Åldrande* kan ses som en kontinuerlig degradering av tillståndet i komponenten och resultatet av den degraderingen kan leda till att komponenter bedöms trasiga. Om vi istället antog att materialutmattning eller åldrande orsakade funktionsfelen i *Växellåda* ansåg vi det troligt att antalet larm skulle stiga inför att funktionsfelet inträffade i takt med degraderingen av tillståndet, förutsatt att växelomläggningar hade förekommit. Eftersom inget sådant mönster tydligt kunde urskiljas analyserades istället om någon yttre händelse kunnat förorsaka några av funktionsfelen i *Växellåda*.

Vid undersökning om eventuella yttre händelser orsakat funktionsfelen studerades de besiktningar från databasen Bessy som genomförts på växelindividerna, se Tabell 9. Tabellen visar när den sista besiktningen genomförts innan funktionsfelet i komponent *Växellåda* inträffade. Resultatet visade att i nära tid till flera av funktionsfelen har besiktningar genomförts, i vissa fall samma dag som funktionsfelen inträffat. En möjlig förklaring till varför vissa funktionsfel inte orsakat larm ansåg vi kunde bero på att de uppkommit till följd av en plötslig yttre händelse, exempelvis en händelse vid besiktning. Vi ansåg oss inte kunna avgöra om funktionsfelen som saknade larm antingen berodde på materialutmattning och åldrande eller på grund av andra yttre händelser.

Tabell 9. Besiktningar av spårväxlar.

Datum för funktionsfel	Växelindivid	Datum senaste besiktning	Datum senaste larm
2018-01-24	Bål 113	2018-01-24	Inget larm
2018-04-10	Cst 421a	2018-03-27	2018-03-28
2018-12-21	Cst 554b	2018-12-19	2018-12-15
2018-02-13	Cst 581a	2017-12-07	2018-01-17
2018-11-22	Duo 131a	2018-11-22	Inget larm
2018-11-11	Ep 131	2018-10-19	2018-10-13
2018-11-06	Gn 132	2018-11-02	Inget larm
2018-01-11	Ke 148a	2017-11-22	Inget larm
2018-03-19	Kmy 103	2018-03-07	2018-03-13
2018-03-16	Lub 132	2018-01-09	Inget larm
2018-11-09	Skby 122	2018-09-12	Inget larm
2018-01-31	So 1130	2018-01-10	2018-01-30
2018-11-27	Äs 724a	2018-10-31	2018-11-14

För spårväxel Bål 113 samt Duo 131a hade besiktningar genomförts samma dag som funktionsfelen i *Växellåda,* men i båda fallen hade inga anmärkningar noterats. Tidpunkt för besiktningarna kunde inte fastställas och således kunde vi inte avgöra om besiktningarna inträffat före eller efter funktionsfelen. Eftersom besiktningarna inte hade resulterat i några anmärkningar gick det inte med säkerhet att bekräfta att funktionsfelen var på uppgång innan besiktningen. Om anmärkning på *Växellåda* hade noterats vid besiktningen hade detta talat för att funktionsfelet varit på uppgång innan besiktningen och inte orsakats av den. Eftersom inga anmärkningar fanns kunde vi varken bekräfta eller förkasta att funktionsfelet i *Växellåda* orsakats i samband med besiktningen.

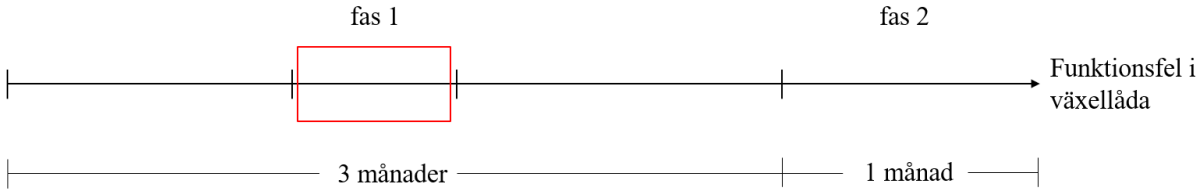
För spårväxel Gn 132 genomfördes en besiktning fyra dagar innan funktionsfelet i *Växellåda* men vid den besiktningen noterades anmärkningar i omläggningsanordningen. Eftersom

växellådan återfinns i omläggningsanordningen ansåg vi det troligt att funktionsfelet varit på uppgång innan besiktningen genomförts. Således fanns ingen indikation på att funktionsfelet i *Växellåda* orsakats i samband med besiktningen.

För spårväxel Cst 554b hade besiktningar genomförts två dagar innan funktionsfelet i *Växellåda* inträffat. Vid besiktningen fanns anmärkning på mätpunkter som åtgärdades genom justering av rälerna. Samtidigt hade Cst 554b påvisat larm innan besiktningen genomförts. Om DS-analys kunde antas skapat ett larm på grund av det uppkommande funktionsfelet i *Växellåda* ansåg vi att funktionsfelet inte bör ha orsakats av besiktningen. Men eftersom funktionsfel registrerats den 20 december respektive den 21 december gick det inte att bekräfta vilket av funktionsfelen som DS-analys i så fall skapade larm för. Dock antog vi att ett samband mellan funktionsfelen var troligt eftersom noteringarna i Ofelia hänvisade till materialutmattning i *Växeldrivsmotor* den 20 december samt materialutmattning i *Växellåda* 21 december, se Bilaga B. Båda komponenter återfinns i omläggningsanordningen.

Delmål 2b: Möjlighet att förutspå funktionsfel i Växellåda genom styrdiagram baserade på omläggningstid

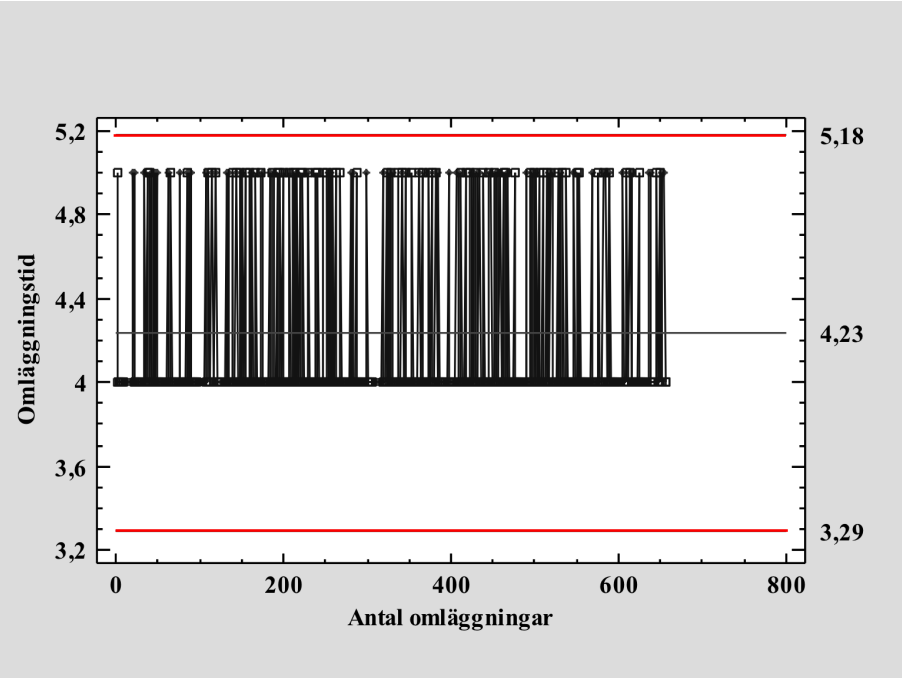
Den andra delen av *Analyse* ämnade undersöka möjligheten att förutspå funktionsfel i *Växellåda* genom tillämpningen av statistisk processtyrning och tillhörande styrdiagram. Likt analysen i Delmål 2a användes data från 30 dagar innan funktionsfelet i *Växellåda* för att undersöka möjligheten att förutspå funktionsfelet genom styrdiagram med omläggningstid. Månaden innan funktionsfelet visualiseras nedan i Figur 12 under fas 2. Därefter undersöktes en tidsperiod på tre månader innan fas 2 för att finna en tidsserie i kontroll att upprätta styrgränser efter. Anledningen till att en period av tre månader valdes var för att säkerställa att styrgränser anpassades från en period som var nära i tid till den fas som ämnades övervakas. I de fall där funktionsfelen inträffat i början av 2018 har data från fyramånadersperioden sträckt sig in i 2017. För att finna en tidsserie till fas 1 som ansågs vara i kontroll valdes en, till synes normal period genom visuell bedömning. Fas 1 representeras av rektangeln i Figur 12.



Figur 12. Presentation av tidsperiod för fas 1 och fas 2.

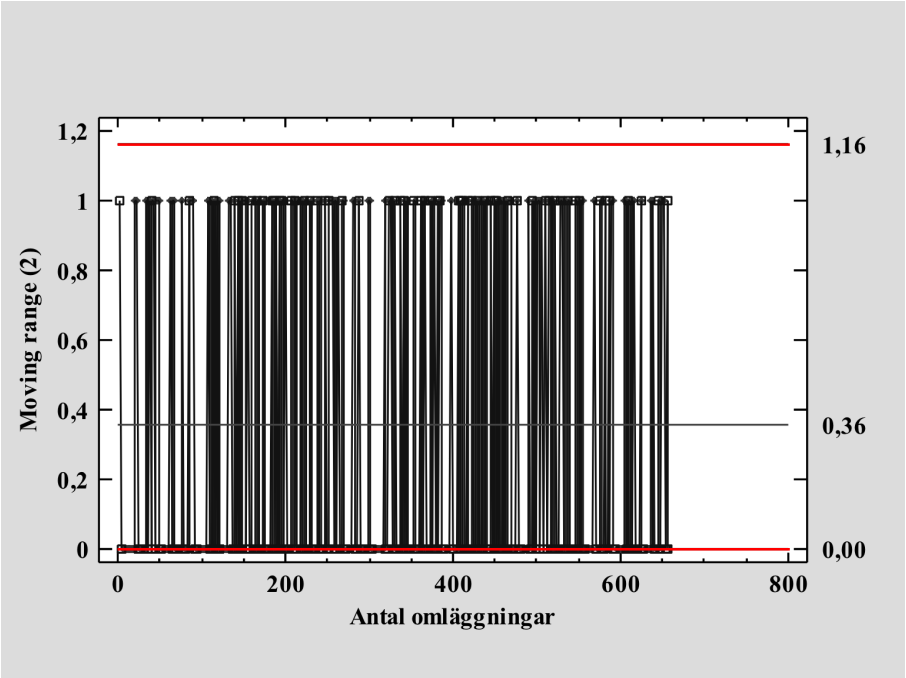
Genom analys av data för omläggningstiden i de 13 spårväxlarna framkom att några spårväxlar påvisade signifikant autokorrelerade data medan andra inte gjorde det med en vald signifikansnivå på 5 %. Nedan följer ett exempel på analys av spårväxel Bål 113 som inte påvisade någon signifikant autokorrelation. Därefter följs ett exempel med spårväxel Cst 421a som påvisade signifikant autokorrelation. Under de tre första månaderna hade Bål 113 ungefär 5150 omläggningar och Cst 421a hade 2150 omläggningar. Diagram för ACF samt PACF över båda spårväxlarna återfinns i Bilaga C. Det område som genom visuell analys valdes att undersökas som fas 1 för upprättandet av styrdiagram redovisas i Bilaga D. Fas 1 för Bål 113 innehöll över 650 mätvärden.

Figur 13 visar styrdiagram för fas 1 med styrgränser beräknade från individuella mätvärden på tre standardavvikelser. Ekvationer för beräkning av styrgränser återfinns i avsnitt 2.3. Eftersom samtliga mätvärden fanns inom styrgränserna kunde fasen anses vara i kontroll utifrån styrdiagrammet. Trunkeringen innebar i detta fall att en omläggningstid på 4,9 sekunder skulle trunkeras till 4 sekunder och en omläggningstid på 5,1 sekunder skulle trunkeras till 5 sekunder. Det skulle innebära att spridningen verkar större än den är i verkligheten och det skulle resulterat i vidare styrgränser. Om däremot omläggningstiden är mellan 4 och 5 sekunder kommer samtliga värden trunkeras till 4. Det innebär således att den skattade spridningen av omläggningstiderna är mindre än den verkliga spridningen vilket i så fall leder till smalare styrgränser och slutligen fler falska larm. Med falska larm menas omläggningstider som hamnar utanför styrgränserna men som vid beaktandet av den verkliga spridningen istället hamnar innanför styrgränserna. Trunkeringen kan därför bidra till en inkorrekt skattning av spridningen. I Figur 13 fanns flertalet mätvärden nära den övre styrgränsen och vi ansåg att trunkeringen kan ha påverkat medelvärdet vilket även skapade en förskjutning av centrallinjen och styrgränserna. Exemplen som följer förutsätter att data är normalfördelad och oberoende, men på grund av trunkeringen kan vi inte säkerställa om data är normalfördelad eller ej. Data i följande exempel visar på ej signifikant autokorrelation och anses därför vara oberoende.



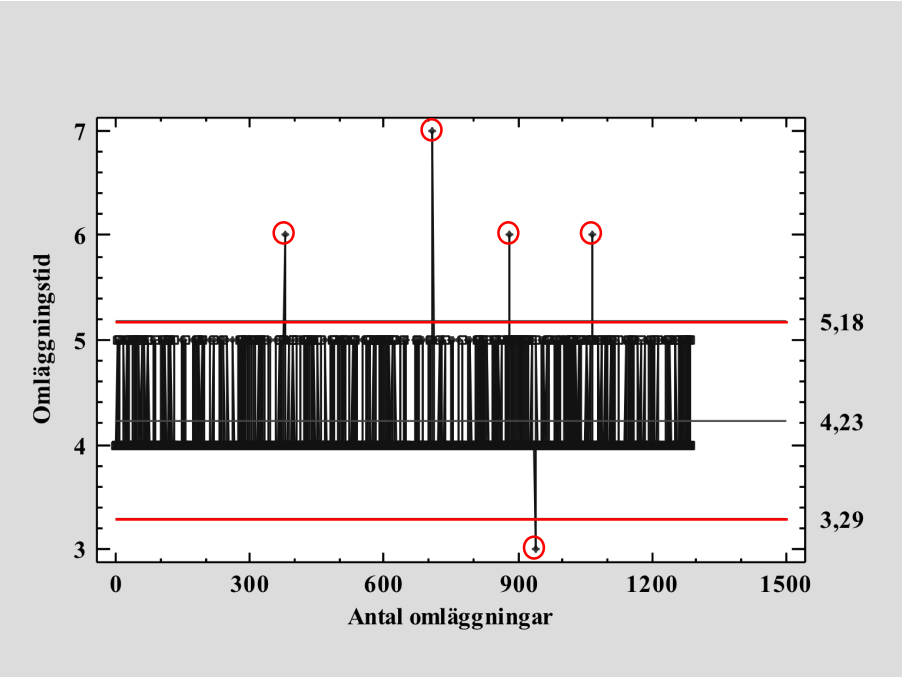
Figur 13. Styrdiagram fas 1 med individuella mätvärden för Bål 113.

Figur 14 visar styrdiagram över fas 1 baserat på *Moving Range (MR)*. Styrdiagrammet visade inga larm eftersom inga punkter hamnade utanför styrgränserna. Eftersom diagrammet plottar skillnaden mellan två på varandra följande mätvärden av en tidsserie med låg variation, delvis på grund av trunkeringen, kan detta förklara varför en stor del av mätningarna plottas med en differens på noll. Således bedömde vi att det stora antalet mätningar på den undre styrgränsen inte påverkade antagandet om att fas 1 ansågs vara i kontroll.



Figur 14. Styrdiagram fas 1 med MR för Bål 113.

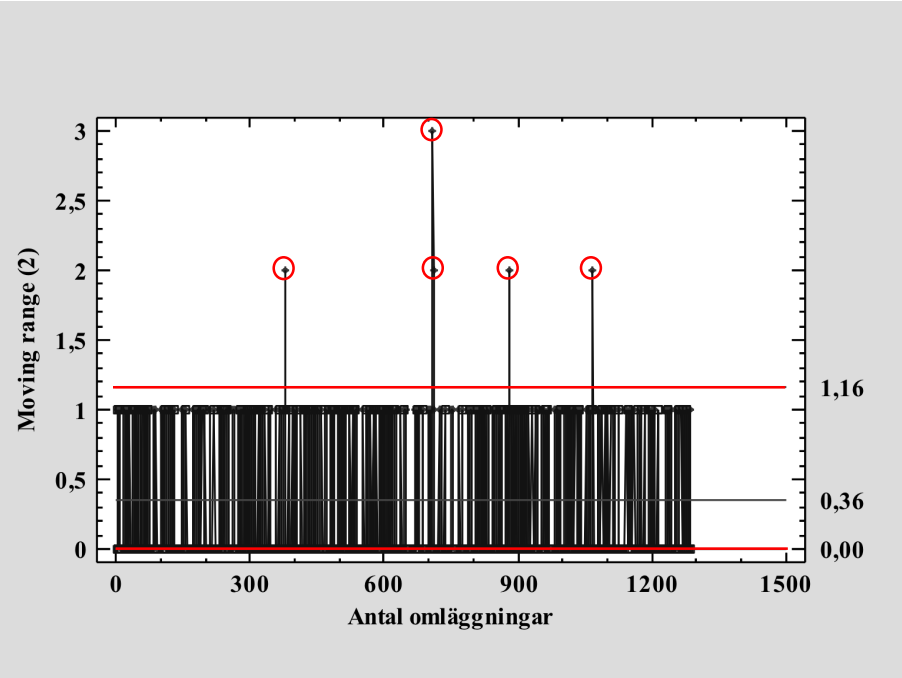
Från fas 1 kunde därefter styrdiagram upprättas för fas 2, se Figur 15. Ur styrdiagrammet identifierades fyra larm där omläggningstiden överstigit den övre styrgränsen samt ett larm där omläggningstiden understigit den nedre styrgränsen. Detta kan jämföras med att inga larm i DS-analys av typen *Lång omläggningstid* noterats för Bål 113. Larmen i Figur 15 indikerade att processen inte var i kontroll och att larmen borde utredas ytterligare, exempelvis genom att be underhållspersonal kontrollera spårväxeln och göra en service av de komponenter som kan påverka omläggningstiden.



Figur 15. Styrdiagram fas 2 med individuella mätvärden för Bål 113.

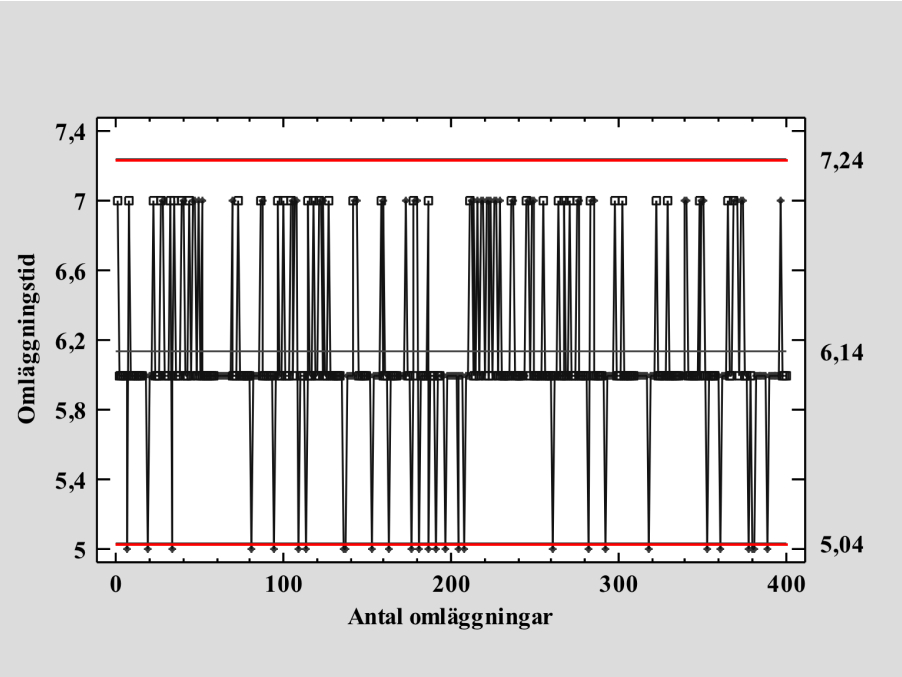
Återigen ansåg vi att trunkeringen påvisar problem eftersom den skattade spridningen kan vara inkorrekt mot den verkliga spridningen vilket kan leda till att styrgränserna blir felaktiga. Exempelvis leder trunkeringen till att eventuella omläggningstider som är högre än den undre styrgränsen på 3,29 sekunder och under 4 sekunder trunkeras till 3 sekunder och således skapas ett larm utan att den faktiska omläggningstiden var utanför den undre styrgränsen.

Styrdiagrammet *MR* för fas 2 visade liksom styrdiagrammet med individuella mätvärden fem larm, se Figur 16. Dessa larm visade att omläggningstiden skiljde sig mer än normalt mellan några av de på varandra följande omläggningarna. Larmet med en differens på tre sekunder ansåg vi borde ha kunnat ge en indikation på att differensen mellan två omläggningstider var onormal och kunnat indikera ett skift. Men på grund av att Figur 15 inte indikerade något ihållande skift i den nuvarande upplösningen kunde ett skift inte bekräftas.



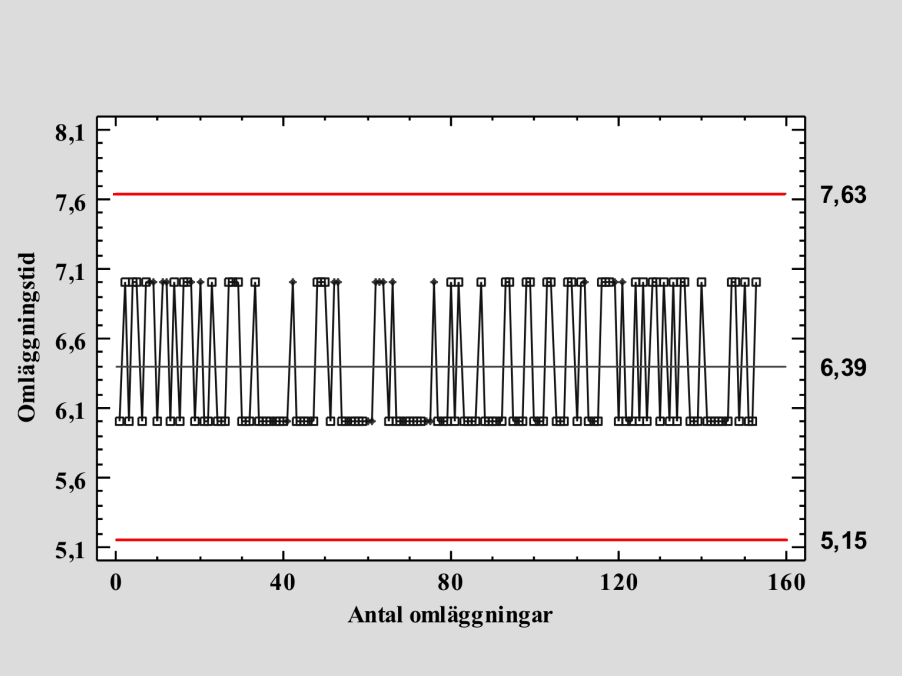
Figur 16. Styrdiagram fas 2 med MR för Bål 113.

Nedan följer exempel på spårväxel Cst 421a som har signifikant autokorrelerade data enligt autokorrelationsfunktionen (ACF) och den partiella autokorrelationsfunktionen (PACF), se Bilaga C. Initialt valde vi de första 400 mätvärdena för att undersöka om perioden kunde anses vara i kontroll för att upprätta styrgränser för fas 1, se Bilaga D för vald period. Genom upprättandet av styrgränserna för individuella omläggningar i Figur 17 undersöktes om perioden med de 400 första mätvärdena kunde anses vara i kontroll. Diagrammet visade dock flertalet larm under den undre styrgränsen. Delvis antog vi att larmen berodde på trunkeringen men eftersom omläggningstiderna i spårväxeln hade visat på signifikant autokorrelation ansåg vi att även det kunna ha en påverkan på vald period i form av lägre skattad spridning och således smalare styrgränser, vilket även beskrivs av Montgomery (2013).



Figur 17. Styrdiagram fas 1 för de 400 första individuella mätvärdena för Cst 421a.

Av den anledningen undersöktes autokorrelationen för perioden med de 400 första mätvärdena vilket påvisade en signifikant positiv autokorrelation hos ACF och den PACF, se Bilaga E. Vi valde då att analysera omläggningstiderna på nytt och valde visuellt en senare period för fas 1 med 150 omläggningar, se Bilaga D. I Figur 18 visas ett styrdiagram över omläggningstiderna i fas 1 med tillhörande styrgränser. Diagrammet visade att samtliga mätvärden i fas 1 hamnade innanför styrgränserna vilket indikerade att fas 1 kunde anses vara i kontroll. Vi undersökte även ACF och PACF för fas 1, se Bilaga E, som visade att det inte fanns signifikant autokorrelation och vi ansåg därför att fas 1 var i kontroll.



Figur 18. Styrdiagram fas 1 för en senare period med 150 individuella mätvärden för Cst 421a.

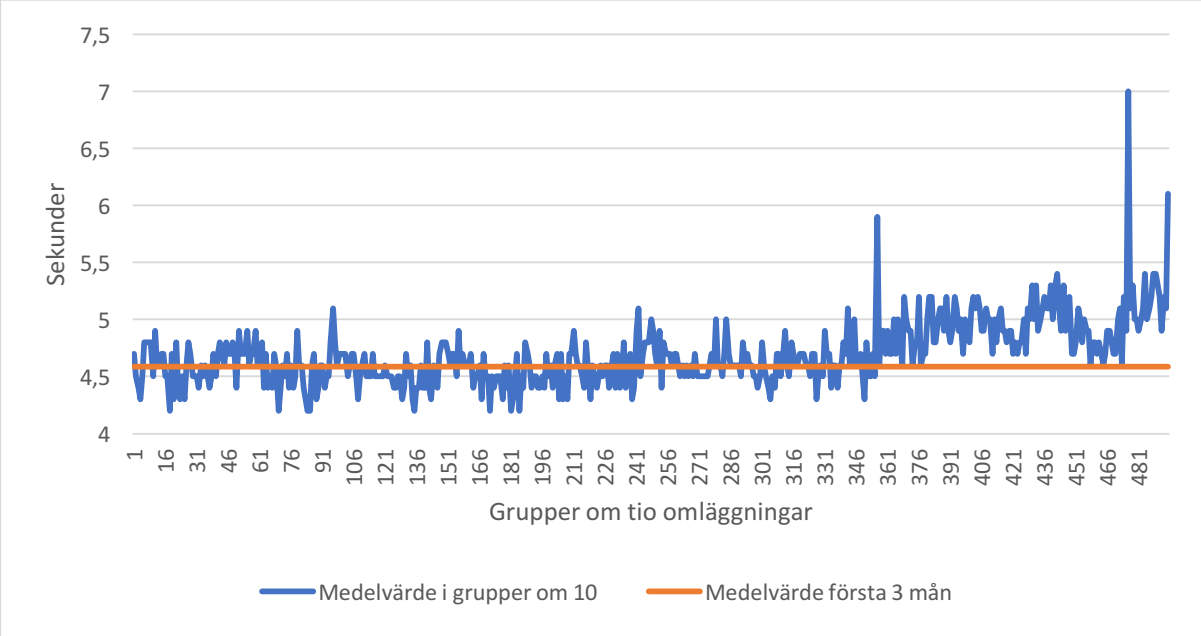
Det kan finnas flera orsaker till autokorrelation och att vissa perioder är signifikant autokorrelerade medan andra är icke-signifikanta. Autokorrelationen kan givetvis bero på att data faktiskt är autokorrelerad, men vi ansåg att det även kunde uppstå falsk autokorrelation på grund av trunkering, skift och kontinuerlig degradering av spårväxelns funktion som påverkar omläggningstiden. Vilken effekt trunkeringen haft på autokorrelationen ansåg vi svår att uppskatta men under den analyserade perioden noterades en successiv ökning av medelvärdet för omläggningstiden fram tills att funktionsfelet i *Växellåda* inträffat. Om inga förklaringar till vad som orsakar autokorrelationen kunde finnas ansåg vi istället en anpassning av tidsseriemodeller enligt ARIMA som möjlig för att tvätta bort autokorrelation och skapa styrdiagram över residualerna. Dock beskriver Montgomery (2013) att data behöver insamlas på jämnt fördelade intervall vid tidsseriemodeller. Exempel på jämnt fördelade intervall kan vara var 24e timme eller var sjunde dag. Eftersom den data som analyserats var omläggningstid så har datainsamlingen styrts av när spårväxlarna använts och således kunde tiden mellan varje omläggning inte styras. Ett alternativ till att säkerställa ungefärlig jämn tid mellan mätvärden var stickprov på förbestämda intervall, men eftersom en stor mängd data förloras i sådana fall bedömde vi att inte undersöka detta vidare.

Exemplen ovan för spårväxel Bål 113 visade att styrdiagram med individuella mätvärden och *MR* hade skapat larm månaden innan funktionsfelet i *Växellåda* uppstått. Larmen innan funktionsfelet innebar att vi inte kunde förkasta idén att det fanns möjlighet att förutspå funktionsfel i *Växellåda* genom styrdiagram med omläggningstid, och därför ansåg vi att inspektion av spårväxlarna bör ske när larm genereras. Vid kontroll av spårväxlarna skulle det därför finnas förutsättningar för att upptäcka funktionsfelen innan de föranlett till en merförsening.

Med anledning av att några av spårväxlarna var signifikant autokorrelerade, vilket vi ansåg försvårade analys genom statistisk processtyrning, undersökte vi medelvärdet av omläggningstid på de 13 spårväxlarna. Genom att undersöka medelvärdet för omläggningstiden var förhoppningen att finna indikationer på att omläggningstiden ökat inför funktionsfelet. Några av spårväxlarna innehöll enstaka omläggningstider över 15 sekunder men under 3600 sekunder. Omläggningstid på 3600 sekunder berodde på att spårväxeln inte kunnat genomföra omläggningen och 3600 sekunder är den maximala tiden som systemet noterar. Samtliga omläggningstider över 15 sekunder antog vi felaktiga med anledningen att spårväxeln kan slira upp till 15 sekunder under omläggning innan strömmen bryts. Dessa omläggningstider manipulerade vi till 16 sekunder för att visa att de har haft en tillräckligt lång omläggningstid för att friktionskopplingen ska ha hunnit bryta strömmen till motorn, men även för att extremt höga värden inte felaktigt skulle påverka skattningar av medelvärden i alltför stor utsträckning.

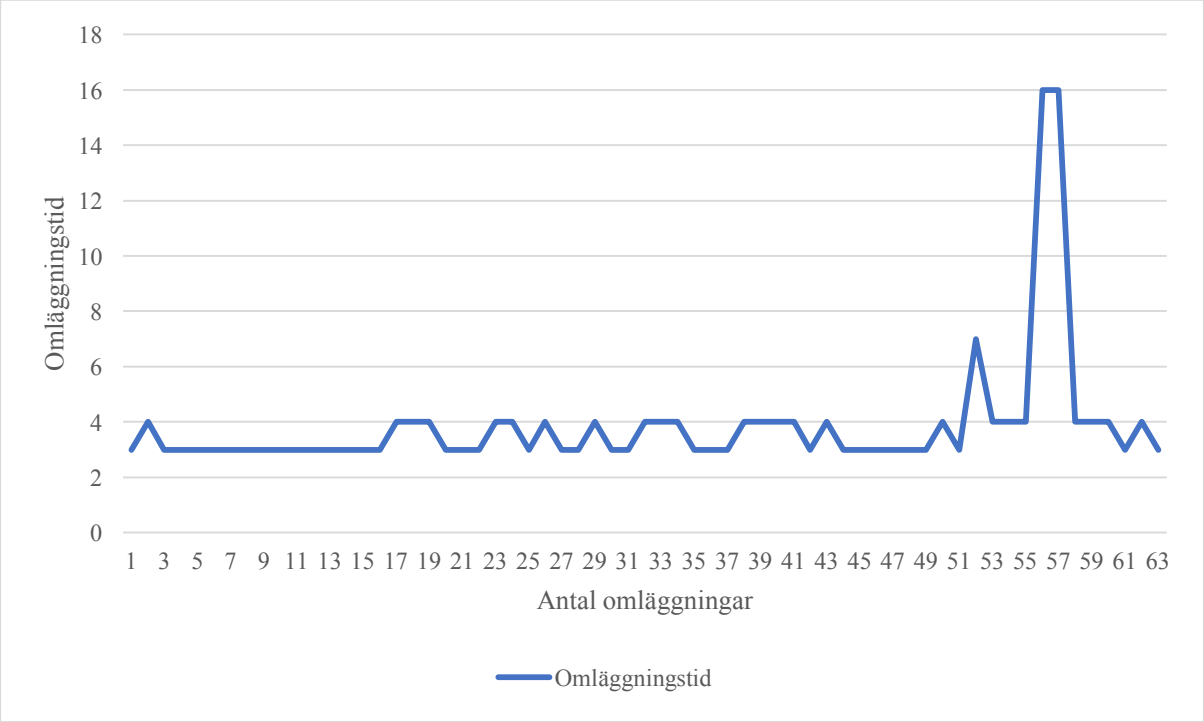
På grund av den låga upplösningen beräknade vi medelvärdet för omläggningstiderna i gruppen om tio på varandra följande omläggningar. Medelvärdet för grupper om tio omläggning ansåg vi kunde möjliggöra att visuellt finna indikationer på mindre förändringar som till följd av trunkeringen annars inte hade synts. 6 av de 13 spårväxlarna hade tydligt ökande medelvärden innan funktionsfelet inträffade. Dessa växlar var Cst 421a, Cst 554b, Duo 131a, Ke 148a, Skby 122 och So 1130, se Bilaga F.

Figur 19 nedan visar medelvärdet för var tionde omläggning under fyra månader innan funktionsfelet inträffade på So 1130. I figuren ser vi tydligt att medelvärdet för omläggningstiden ökade de sista 140 omläggningarna innan funktionsfelet inträffade. Funktionsfelet inträffade i januari då det kan finnas både snö och is vid spårväxeln. Vi förutsatte dock att det fanns fungerande växelvärme eftersom inga noteringar om felande växelvärmeelement funnits i Ofelia. Av den anledningen antog vi att vädret inte borde haft en alltför stor påverkan på omläggningstiden. Detta skulle kunna tyda på att en materialutmattning i *Växellåda* inträffat som skulle kunnat indikeras genom små skift i omläggningstiden om styrdiagram varit implementerade för data med högre upplösning. I figuren finns en orange horisontell linje som visar medelvärdet för de tre första månaderna. Linjen tydliggör förändringen i medelvärdet av omläggningstid månaden inför funktionsfelet i *Växellåda*. Tolkningen av Figur 19 var således att antalet omläggningar med längre omläggningstider ökat sista månaden innan funktionsfelet.



Figur 19. Medelvärde för grupper om tio omläggningar under 4 månader innan funktionsfel i Växellåda för So 1130.

De spårväxlar med få omläggningar ansåg vi fick för låg upplösning när vi undersökte om medelvärdet i grupper om tio ökat, vilket gjorde att vi endast undersökt de faktiska omläggningarna visuellt. Det vi såg var att 3 av de 13 spårväxlarna, Ep 131, Gn 132 och Kmy 103, hade långa omläggningstider innan funktionsfelen inträffade. Figur 20 nedan visar omläggningstiden för Ep 131 månaden innan funktionsfelet uppstod, varpå vi kunde notera längre omläggningstider innan funktionsfelet. Gn 132 och Kmy 103 presenteras i Bilaga G. Vi antog att dessa växlar kunde ha resulterat i larm om styrdiagram varit implementerade för data med högre upplösning, varpå vi ansåg att det funnits möjlighet att upptäcka funktionsfelet innan det uppstod. Vi ansåg oss till följd av dessa nio spårväxlar inte kunna utesluta att omläggningstiden kunde vara en indikation på en kontinuerlig degradering av tillståndet i spårväxeln.



Figur 20. Omläggningstid under en månad innan funktionsfel i Växellåda för Ep 131.

4.3 Delmål 3: Upprätta rekommendationer

Avsnittet presenterar förbättringsförslag och rekommendationer från *Analyse*. I *Improve* presenteras förbättringsförslag och i *Control* de slutliga rekommendationerna. Därefter presenteras den uppskattade besparingen.

4.3.1 Improve

Resultatet av *Analyse* visade flera förbättringsområden med tillhörande förbättringsförslag för att kunna undersöka möjligheten att förutspå funktionsfel genom styrdiagram med omläggningstid. Nedan presenteras förbättringsförslag gällande insamling av omläggningstider i DS-analys, larm i DS-analys samt felrapportering i Ofelia.

Förbättringsförslag för insamling av omläggningstid i DS-analys

Vid analysen om det fanns möjlighet att förutspå funktionsfel i *Växellåda* genom styrdiagram med omläggningstid framkom svårigheter med upplösningen av data till följd av trunkeringen. Trunkeringen ledde till att spridningen av omläggningstiderna blev inkorrekt vilket kan ha en negativ påverkan på arbete med styrdiagram. Trunkeringen försvårade även analys av grundorsaker till autokorrelation. Av den anledningen föreslår vi att:

Förslag 1: Vidta åtgärder för att öka mätnoggrannheten vid mätning av omläggningstid till minst två decimaler.

Högre mätnoggrannhet skulle innebära att skattningen av spridningen är närmare den verkliga spridningen och således förbättras förutsättningarna att övervaka tillståndet i växelomläggningarna. En högre mätnoggrannhet skulle dessutom göra det möjligt att undersöka spridningen från insamlingen av omläggningstiden via tågledningssystemet. Eftersom data ska färdas från spårväxel till ställverk till tågledningssystem så kan det finnas en spridning för hur lång tid det tar för statusförändringen att nå från spårväxeln till tågledningssystemet. I de fall där spridningen skattas större än den verkliga spridningen kan möjligheten att upptäcka larm försämras medan i de fall där spridningen skattas för lågt kan falska larm skapas. Båda fallen påverkar arbete med styrdiagram negativt.

Förbättringsförslag för larm i DS-analys

I *Analyse* framkom villkoret för larmet *Lång omläggningstid* som problematiskt. Larmgränserna beräknas i dagsläget för varje spårväxelindivid från ett medelvärde av omläggningstiden under den senaste månaden med ett påslag på 2-3 sekunder. Påslaget är inte individuellt beräknat utan är samma för samtliga spårväxlar och tar därför inte hänsyn till spårväxlarnas individuella spridning. Detta påslag kan därför resultera i för vida eller för smala styrgränser. Dessutom var beräkningen av larmet problematiskt eftersom det beräknas efter månadens medelvärde. Ett sådant larm har inte möjlighet att upptäcka kontinuerliga skift i omläggningstiden. Om en kontinuerlig ökning av omläggningstiden inträffar under en längre tidsperiod tar istället systemet med ökningen av omläggningstid vid beräkningen av larmgränserna. En annan typ av statistiskt beräknade larmgränser är Shewhart-styrdiagram där styrgränserna beräknas med tre standardavvikelser. Av denna anledning föreslår vi att:

Förslag 2: Beräkna larmgränser för Lång omläggningstid enligt framtagandet av Shewhart-styrdiagram och identifiera orsaken till autokorrelerade data.

Om larmgränserna för *Lång omläggningstid* baseras på spridningen av omläggningstiderna från en period som bedöms vara i kontroll kan dessa antas återspegla omläggningsprocessen när den är stabil. Om avvikelser så som skift noteras bör omläggningstiderna kontrolleras tills dess att processen kan antas vara i kontroll igen och nya larmgränser kan beräknas. Larmgränserna bygger då på spridningen av omläggningstiderna i en stabil period och eventuella förändringar i processen påverkar därför inte styrgränserna.

Förbättringsförslag för rapportering i Ofelia

Likt tidigare bedömningar av bland annat WSP (2011) framkom flera brister i data från Ofelia. Delvis bedömde vi att bortfallet i databasen i form av orsakstypen *Ingen känd orsak* försvårade analysen eftersom en stor andel av funktionsfelen inte har kunnat härledas till en speciell orsak. Därefter framkom även kategoriseringen av orsaker som problematisk. Exempelvis lyftes under *Analyse* ett problem med att vissa orsakstyper så som *Komponent trasig* snarare beskrev en effekt av ett funktionsfel än en orsak. Slutligen observerades stora bortfall i orsaks- och åtgärdsbeskrivningar. Sammantaget ansåg vi att dessa brister försvårade analyser av de funktionsfel som rapporteras in i Ofelia. Eftersom Ofelia är en central del av felavhjälpningen har vi förståelse för omfattningen av eventuella förändringar. Trots detta föreslår vi att:

Förslag 3: Undersöka möjligheterna att minska osäkerheten i rapporteringen av funktionsfel i Ofelia.

Detta föreslår vi kan ske genom att undersöka användningen av fält för fritext för att se om fälten kan kompletteras med rullistor alternativt presentera rutiner för vad som ska nämnas i dessa. Implementering av tydliga rutiner och instruktioner för val av orsakskategori kan bidra till färre registrerade funktionsfel i kategorin *Ingen känd orsak.* Om osäkerheten i Ofelia kan minskas är det vår uppfattning att även osäkerheten vid analys av framtida funktionsfel minskar.

4.3.2 Control

Icke-autokorrelerade data som insamlats efter att *Förslag 1* och *Förslag 2* har införts kan nyttjas för att upprätta styrdiagram för att på så sätt kontrollera tillståndet i spårväxlarna. Ökad mätnoggrannhet innebär förbättrad upplösning på styrdiagram med individuella mätvärden och *MR*. Samtliga ekvationer som krävs för att upprätta styrdiagrammen finns beskrivna i avsnitt 2.3. Givet det stora antal spårväxlar som Trafikverket ansvarar för så rekommenderar vi att kontroll av styrdiagram sker automatiskt och att larm skapas när mätvärden hamnar utanför de individuellt beräknade styrgränserna. En manuell kontroll av styrdiagrammen skulle kräva stora resurser och vi anser även att det är stor risk att larm missas.

Förutom styrdiagram för individuella mätvärden och *MR* kan små skift detekteras med hjälp av CUSUM och EWMA, men eftersom de kräver att data är insamlad under ett jämnt intervall så innebär det att stickprov kan vara en lösning för att jämnt samla in data och upprätta styrdiagram. Vi anser dock att detta endast kan vara aktuellt efter att *Förslag 2* är implementerat. Om data är autokorrelerad efter att *Förslag 2* implementerats rekommenderar

vi tidsseriemodeller och styrdiagram på residualer vilket beskrivs djupare av bland annat Alwan (1991). När våra rekommendationer är genomförda och styrdiagram för individuella mätvärden och *MR* är upprättade så finns möjligheten att reducera uppkomsten av funktionsfel och därmed även reducera uppkomsten av tågstörande fel.

Uppskattad besparing

6 av de 13 spårväxlarna som vi undersökte i *Analyse* har haft en ökning i medelvärdet av omläggningstiden och 3 av de 13 spårväxlarna uppvisade långa omläggningstider innan funktionsfelen i *Växellåda* inträffade. Därav ansåg vi att det fanns en indikation på ett samband mellan den ökande omläggningstiden och materialutmattning i *Växellåda.* Om styrdiagram hade funnits implementerade hade larm utlösts då omläggningstiden ökat. Det hade kunnat leda till underhåll av *Växellåda* innan funktionsfelet inträffade och således hade merförseningar i tågtrafiken kunnat undvikas. Om de nio spårväxlarna med ökad omläggningstid hade kunnat åtgärdas innan funktionsfelen i *Växellåda* lett till merförseningar hade det enligt Tabell 7 inneburit en besparing på ungefär 226 merförseningsminuter per tågstörande fel. Från besparingspotentialen i *Measure* antog vi att kostnaden per merförseningsminut ligger mellan 838 kronor och 2 632 kronor, vilket hade det inneburit en besparing på intervallet:

$$Besparing_{9\ funktionsfel} = [838 * 9 * 226;\ 2\ 632 * 9 * 226] = [1\ 704\ 492\ SEK;\ 5\ 353\ 488\ SEK].$$

Utöver den samhällsekonomiska besparingen hade dessutom besparingar i materialkostnad kunnat göras till följd av att underhåll utförs innan funktionsfel inträffat. Om underhållet skulle kunna förhindra att *Växellåda* behövde bytas ut skulle materialkostnaden för *Växellåda* kunnat undvikas. Som förklarat i *Measure* uppgår materialkostnaden för *Växellåda* till 30 000 SEK per enhet, vilket hade inneburit en besparing upp till:

$$Besparing_{Materialkostnad\ 9\ Växellådor} = [9 * 30\ 000] = [270\ 000\ SEK].$$

Om vi dessutom antar att vårt urval av spårväxelindivider speglar verkligheten gällande hur många växellådor som kunnat visat indikationer på ökad omläggningstid så motsvarar 9 av 13 spårväxlar 69%. Under 2018 så förutsatte vi i besparingspotentialen under *Measure* att 5907 merförseningsminuter skulle spegla samtliga funktionsfel i *Växellåda* i Region Öst, även de utan orsaks- eller åtgärdsbeskrivning. Om 69% av dessa merförseningsminuter skulle ha kunnat undvikas till följd av att upptäcka funktionsfel i *Växellåda* innan de inträffat skulle det inneburit en besparing på:

$$Besparing_{Växellåda} = 69\% * [838 * 5907;\ 2\ 632 * 5907] = [3\ 415\ 546\ SEK;\ 10\ 727\ 585\ SEK].$$

Genom det tillståndsbaserade underhållet finns även möjlighet att sätta in underhållsåtgärder innan en komponent måste bytas ut, vilket kan leda till ökad livslängd hos komponenter. Det skulle kunna innebära ekonomiska besparingar till följd av ökad livslängd. Vi har dock inte tagit hänsyn till denna besparing på grund av svårigheterna innan implementering att uppskatta en eventuell ökning av livslängden.

5 Slutsatser

I kapitlet besvaras examensarbetets tre delmål. Därefter lämnas rekommendationer i form av förbättringsförslag för att uppfylla syftet.

Delmål 1 var att identifiera de tågstörande fel i spårväxlar som orsakat flest antal merförseningsminuter per fel besvarades i fallstudiens *Measure*-steg där det framgick att komponenten *Växellåda* hade flest merförseningsminuter per tågstörande fel.

Delmål 2a som handlade om att undersöka möjligheten att förutspå funktionsfel genom larm från DS-analys besvarades i *Analyse*. Efter att vi analyserat data visuellt fastställde vi att det inte gick att se något tydligt samband mellan larm från DS-analys och de funktionsfel som inträffat. För de spårväxelindivider där DS-analys inte genererat några larm kunde vi varken bekräfta eller förkasta att funktionsfelen uppkommit till följd av yttre händelser, exempelvis i samband med besiktningar.

Delmål 2b berörde möjligheten att förutspå funktionsfel genom styrdiagram med omläggningstid från DS-analys vilket besvarades i *Analyse*. Med hjälp av statistisk processtyrning kunde vi se att mätvärden hamnat utanför styrgränserna innan funktionsfelet inträffade vilket kunde indikera på möjligheten att använda omläggningstid för att förutspå funktionsfel i *Växellåda*. Till följd av att vissa spårväxlar var autokorrelerade kunde vi inte säkerställa att styrgränserna var korrekta. Eftersom vi inte kunde säkerställa vad autokorrelationen berodde på valde vi därför att endast ta fram exempel på styrdiagram för icke-autokorrelerade spårväxlar. I samma spårväxel fann vi att det fanns perioder i kontroll som både var autokorrelerade och icke autokorrelerade. Orsaken till autokorrelation behöver undersökas ytterligare, men vi ansåg att förklaringar kunde vara trunkering, skift eller degradering av spårväxelns funktion. Eftersom flertalet av spårväxlarna var autokorrelerade, vilket kan påverka styrgränserna, valde vi istället att undersöka medelvärdet för spårväxlarna. Utifrån medelvärdet ansåg vi att det fanns indikationer på samband mellan omläggningstiden och funktionsfelen i *Växellåda* eftersom 9 av 13 växlar hade ökade omläggningstider innan funktionsfelet inträffade. Analysen av Delmål 2b visade att omläggningstiden kunde indikera funktionsfel i *Växellåda* till skillnad från larmet *Lång omläggningstid* i Delmål 2a som enbart uppkom i två spårväxlar.

Det tredje delmålet att upprätta rekommendationer för hur uppkomsten av funktionsfel i spårväxlar kan reduceras besvarades i *Improve* där följande tre förslag lämnades:

Förslag 1: Vidta åtgärder för att öka mätnoggrannheten vid mätning av omläggningstid till minst två decimaler.

Förslag 2: Beräkna larmgränser för Lång omläggningstid enligt framtagandet av Shewhart-styrdiagram.

Förslag 3: Undersöka möjligheterna att minska osäkerheten i rapporteringen av funktionsfel i Ofelia.

Resultatet av dessa delmål och fallstudiens *Control*-steg beskriver hur insamlade data ska förbättras och hur den ska nyttjas för att upprätta Shewhart-styrdiagram. Styrdiagrammen kan

hjälpa att övervaka processen och därför rekommenderar vi Trafikverket använda omläggningstiden för att reducera uppkomsten av tågstörande fel i spårväxlar.

6 Diskussion

Kapitlet presenterar en diskussion om arbetsgången och de val som legat till grund för examensarbetet. Efter arbetsgången diskuteras arbetets validitet och reliabilitet följt av förslag på framtida studier baserade på observationer och resultat från examensarbetet.

6.1 Examensarbetets arbetsgång

För att besvara syftet i examensarbetet valde vi DMAIC som problemlösningsmetod. Valet ansågs lämpligt för att finna systematiska tillvägagångssätt för att undersöka möjligheten att förutspå funktionsfel genom larm i DS-analys samt genom styrdiagram med omläggningstid. Det systematiska tillvägagångssättet genom de fem stegen bidrog till att tydliggöra planeringen av arbetet. Problemlösningsmetoden angav även riktlinjer för arbetssättet inom respektive steg. Det vi ansåg var en av DMAIC-processens styrkor var att processen itereras cykliskt, men på grund av examensarbetets tidsbegränsningar kunde ingen iteration genomföras. Trots det ansåg vi att rekommendationerna från examensarbetet kunde möjliggöra fortsatta iterationer och därigenom bidra till djupare analyser och resultat.

Examensarbetet baserades till stor del på befintliga databaserna som erhölls av Trafikverket. För att besvara Delmål 1 var Ofelia central och således även kvaliteten av informationen i databasen. Databasen visade att 35% av alla inrapporterade orsakstyper under 2018 inte hade någon känd orsak. Alltså innehöll databasen ett bortfall på över en tredjedel och tillika en förlust på en stor mängd information som kunnat beskriva funktionsfelen i spårväxelpopulationen. Likaså uppstod stora förluster av information på ungefär 70% bland *orsaks*- och *åtgärdsbeskrivningar* vid *Materialutmattning/Åldrande* samt *Komponent trasig*. Trots bortfallet valdes *orsaks*- och *åtgärdsbeskrivningar* att studeras närmare. Bland den information som återstod angavs ofta vilken komponent som orsakats skada alternativt åtgärdats. Denna information bedömde vi som viktig för att bryta ner problemet till komponentnivå och därigenom till en hanterlig datamängd. Effekten av bortfallet ansåg vi var svår att uppskatta men att det fanns möjligheter att informationen som saknades kunde visat att andra komponenter än *Växellåda* haft störst potential per tågstörande fel. Likaså kunde bortfallet även innehålla information som ytterligare bekräftade omfattningen av funktionsfelen på komponentnivå.

Vid besvarandet av Delmål 2a respektive Delmål 2b användes databasen DS-analys. För båda delmålen var upplösningen på omläggningstiden problematiskt på grund av extrema värden. Extrema värden ansågs påverka larmet *Lång omläggningstid* eftersom systemet baserade larmgränserna på ett medelvärde för föregående månads omläggningstider. Om enbart ett fåtal omläggningar utförts under en månad kan ett extremt värde på maximalt 3600 sekunder höja medelvärdet och således ge felaktiga larmgränser. Tiden för de extrema värdena berodde även på hur snabbt tågledningscentralen lyckades få växeln i kontroll. Det innebär att tiden delvis är beroende av hur snabbt de skickar ett nytt kommando om omläggning till växeln. Upplösningen på data till följd av trunkeringen påverkade Delmål 2b och hade stor inverkan på tillämpandet av styrdiagram vilket ytterligare försvårade analyser. Ett grundantagande för styrdiagrammen var dessutom att data var normalfördelad, men till följd av trunkeringen kunde inte det säkerställas. Trots dessa ovan nämnda problem ansåg vi att databasen var intressant att

undersöka eftersom den gav förutsättningar för tillståndsbaserad övervakning i realtid. Det var dessutom vår uppfattning att genomförandet av förbättringsförslagen nämnda i avsnitt 4.3.1 delvis skulle adressera detta problem. En högre upplösning ansåg vi dessutom skulle göra styrdiagram så som CUSUM och EWMA mer intressanta för att upptäcka mindre skift men eftersom vi ansåg att förutsättningarna för detta inte fanns i dagsläget undersöktes styrdiagrammen inte närmare.

6.2 Validitet och reliabilitet

Något som har påverkat validiteten i examensarbetet berörde kvalitetsbrister i Ofelia. Eftersom möjligheter till inrapportering via fritext finns kan rapporteringarna skilja från fall till fall beroende på vad och hur underhållsentreprenören noterar i Ofelia. Eftersom entreprenören också kan välja att avstå från att skriva i fält med fritext kan information om funktionsfelet gå förlorad vid inrapporteringen till Ofelia. Detta kan då kopplas till den interna validiteten, alltså hur väl data återspeglar verkligheten. I ett idealt läge ansåg vi att Ofelia borde återspegla verkligheten väl men eftersom data från Ofelia påverkas i stor grad av underhållsentreprenören ansåg vi även att det fanns argument som talade för motsatsen. Trots det ansåg vi att Ofelia var central för att svara på Delmål 1. Därav ansåg vi det nödvändigt att utgå från att den data som fanns registrerad var korrekt och återspeglade verkligheten. Däremot ämnade vår rekommendation om Ofelia att adressera denna problematik.

Under Delmål 2b diskuterades problematiken med autokorrelerade data och möjligheten att använda tidsseriemodeller, exempelvis ARIMA-modeller, för att hantera autokorrelerade data. Till följd av osäkerheten i data till på grund av trunkeringen så var det svårt att rekommendera lämpliga ARIMA-modeller eftersom trunkerade data inte riktigt speglar verkligheten. Vi lämnade därför inga rekommendationer för ARIMA-modeller eftersom dessa rekommendationer skulle grunda sig i lågupplöst data.

Vi noterade även under Delmål 2b en ökning av medelvärdet i omläggningstiderna på flertalet spårväxlar under månaden innan funktionsfelet i *Växellåda*. Några av dessa noterades under vinterhalvåret. Vi gjorde ett antagande denna ökningen inte borde bero på ej fungerande växelvärme eftersom inga funktionsfel i växelvärmelementen noterats i Ofelia för samma period. Men trots fungerande växelvärmeelement fanns risken att snö och is har påverkat omläggningstiden vilket i så fall skulle påverka den interna validiteten.

Hur inrapporteringen till Ofelia kan skilja från fall till fall ansåg vi även påverkade reliabiliteten i examensarbetet, alltså hur väl resultatet kan anses konsekvent över tid. Exempelvis finns en risk att två olika entreprenörer beskriver samma funktionsfel på två olika sätt. Det innebär att om flera bedömningar skulle göras på samma funktionsfel finns det risk att bedömningarna varierar. Eftersom orsakstyper i Ofelia användes för att svara på Delmål 1 ansåg vi därför att reliabiliteten i data bör lyftas.

Valet att avgränsa spårväxelpopulationen till Region Öst möjliggjorde djupare analyser och det fanns därför möjlighet att generalisera resultatet på andra spårväxlar. En förutsättning för att implementera våra rekommendationer var att omläggningstiden mäts automatiskt hos varje spårväxelindivid, något som DS-analys gör i Region Syd och Region Väst. Men för att

möjliggöra en generalisering av examensarbetets resultat ansåg vi att fler fall av funktionsfel i *Växellåda* bör undersökas med högre upplösning av omläggningstiderna.

Resultatet av examensarbetet visade på en ökad omläggningstid inför funktionsfelet i *Växellåda* i 9 av de 13 spårväxlarna som analyserats, vilket motsvarar 69%. I *Control* uppskattades en besparing utifrån ett antagande att dessa 69% kunde generaliseras över samtliga funktionsfel i *Växellåda*. Men på grund av storleken på bortfallet i orsaks- och åtgärdsbeskrivningar i Ofelia kunde vi inte bekräfta att dessa 69% motsvarade andelen funktionsfel i Ofelia. Således kunde fördelningen av funktionsfel och därigenom besparingspotentialen se annorlunda ut om bortfallet varit mindre.

6.3 Framtida studier

Under examensarbetet har sex områden för framtida studier observerats.

Påverkan av besiktningar på spårväxlarna

Något som lyftes under Delmål 2a var om utförda besiktningar kunnat förorsaka funktionsfel i *Växellåda*. Under analysen observerades att två av funktionsfelen inträffat samma dag som besiktningar medan två funktionsfel inträffat några dagar efter besiktningar. Av tidsmässiga skäl kunde eventuella samband mellan besiktningar och funktionsfel inte analyseras vidare i denna rapport. Således ansåg vi det intressant för framtida studier att undersöka om utförandet av besiktningar alternativt utförda åtgärder kan föranleda till funktionsfel.

Rapportering av funktionsfel i Ofelia

Under Delmål 1 noterades brister i Ofelia i form av bortfall och otydliga noteringar. Vi noterade dessutom att det som i Ofelia benämndes som orsaker i själva verket kunde vara både orsaker och följder av orsaker. Exempelvis hur *Komponent trasig* användes som orsaktyp snarare än en följd av en orsak. Av dessa anledningar rekommenderar vi vidare studier i hur rapporteringen av funktionsfel bör utformas för att säkerställa att rapportering sker på samma sätt för liknande funktionsfel. Om rapporteringen kan utformas så att information inte går förlorad och att beskrivningarna ser likvärdiga ut, så var vår uppfattning att en större andel data i Ofelia skulle bli användbar för framtida analyser.

Diagnostisering av funktionsfel genom analys av omläggningstider

De rekommendationer som presenterats gällande styrdiagram skapar larm när omläggningstiden överstiger dess larmgränser. Men som beskrivet av Asada, Roberts och Koseki (2013) bör tillståndsbaserade övervakningssystem även möjliggöra diagnostisering av funktionsfel. Av denna anledning föreslår vi vidare studier i diagnostisering av funktionsfel med hjälp av omläggningstiden i spårväxlar. Ett förslag på diagnostisering är kontrollerade omläggningar där funktionsfel kan stressas fram. Om funktionsfelet kan diagnostiseras utifrån omläggningstiden kan dels identifieringen av funktionsfel och även planerandet av mindre akuta underhållsåtgärder förenklas. För att genomföra en sådan typ av studie anser vi att det behövs en högre upplösning av omläggningstider än vad som finns tillgängligt idag.

Spridning av omläggningstiden till följd av insamling via tågledningssystemet

I takt med att upplösningen av omläggningstiden ökar rekommenderar vi att undersöka storleken på spridningen i omläggningstid till följd av insamlingen via tågledningssystemet. Beroende på storleken på spridningen påverkas tillämpningen av larmgränser för omläggningstid i olika grad. Om spridningen på insamlingen uppskattas som stor i förhållande till den faktiska omläggningstiden kan larm i vissa fall genereras trots att den faktiska omläggningstiden inte översteg larmgränsen. Om spridning är stor rekommenderar vi att undersöka andra alternativ till hur omläggningstiden bör insamlas.

Undersöka orsaker till autokorrelation i spårväxlar

Under examensarbetet har vi noterat perioder med autokorrelation samt perioder utan autokorrelation i samma spårväxel. Anledningarna till autokorrelationen ansåg vi möjligtvis kunde förklaras genom bland annat trunkering, skiften i omläggningstid och eventuell degradering av funktion till följd av materialutmattning. Vi föreslår därför vidare studier för att undersöka förklaringar till autokorrelationen i spårväxlar.

Undersöka skillnader mellan höger- och vänsteromläggningar vid styrdiagram

Praktiker samt tidigare litteratur framhäver vikten av att skilja analyser av höger- och vänsterläge vid spårväxelomläggningar. På grund av den låga upplösningen av data bedömdes detta inte möjligt under examensarbetet. Men av den anledningen rekommenderar vi att undersöka vilka eventuella skillnader som finns mellan höger- och vänsterläge samt hur styrgränser uttagna från statistisk processtyrning i så fall bör anpassas efter dessa.

7 Referenser

Alwan, L. C. (1991). Autocorrelation: Fixed versus variable control limits. *Quality Engineering,* 4(2), 167-188.

Asada, T., Roberts, C., & Koseki, T. (2013). An algorithm for improved performance of railway condition. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 30, 81-92.

Ciocoiu, L., Siemieniuch, C. E., & Hubbard, E. M. (2017). From preventative to predictive maintenance: The organisational challenge. *Journal of Rail and Rapid Transit,* 231(10), 1174-1185.

David, M., & Sutton, C. (2011). *Samhällsvetenskaplig metod.* Lund: Studentlitteratur AB .

De Mast, J., & Lokkerbol, J. (2012). An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. *International Journal of Production Economics,* 139(2), 604-614.

Fumeo, E., Oneto, L., & Anguita, D. (2015). Condition based maintenance in railway transportation systems on big data streaming analysis. *Procedia Computer Science,* 53, 437-446.

Hegedűs, C., Ciancarini, P., Frankó, A. K., Moldován, I., Papa, G., Poklukar, Š., . . . Varga, P. (2018). Proactive maintenance of railway switches. *International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, 725-730.

Hodge, V. J., O'Keefe, S., Weeks, M., & Moulds, A. (2015). Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 16(3), 1088-1106.

Järnvägsskolan. (u.å.). *Banteknik.*

Jönsson, O., & Lundström, K. (2018). *Dramatisk ökning av fel på landets järnvägsväxlar*. Hämtat från SVT Nyheter 2019-02-15: https://www.svt.se/nyheter/inrikes/dramatisk-okning-av-fel-pa-landets-jarnvagsvaxlar

Linderman, K., McKone-Sweet, K. E., & Anderson, J. C. (2005). An integrated systems approach to process control and maintenance. *European Journal of Operational Research,* 164(2), 324-340.

Lundin, M. (2007). *Samhällsekonomiska kostnader för störningar i järnvägssystemet.* Stockholm: Transportforskningsgruppen.

Lundkvist, P. (2015). *Application of Statistical Methods: Challanges Related to Continous Industrial Processes.* Luleå: (Doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet).

Márquez, F. P., & Schmid, F. (2007). A digital filter-based approach to the remote condition monitoring. 92(6), 830-840.

Márquez, F. P., Pedregal, D. J., & Roberts, C. (2015). New methods for the condition monitoring of level crossings. *International Journal of Systems Science,* 46(5), 878-884.

Márquez, F. P., Schmid, F., & Collado, J. C. (2003a). A reliability centered approach to remote condition monitoring. A railway points case study. *Systems Safety,* 80(1), 33-40.

Márquez, F. P., Schmid, F., & Collado, J. (2003b). Wear assessment employing remote condition monitoring: a case study. *Wear,* 255(7-12), 1209-1220.

Márquez, F. P., Tercero, D. J., & Schmid, F. (2007). Unobserved component models applied to the assessment of wear in railway points: A case study. *European Journal of Operational Research,* 176(3), 1703-1712.

Montgomery, D. C. (2013). *Statistical quality control.* Singapore: John Wiley & Sons.

Nissen, A. (2005). *Analys av statistik om spårväxlars underhållsbehov.* (Doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet).

Nissen, A. (2009). *Development of life cycle cost model and analyses for railway switches and crossings.* (Doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet).

Pedregal, D. J., García, F. P., & Schmid, F. (2004). RCM2 predictive maintenance of railway systems based on unobserved. *Reliability Engineering & System Safety,* 83(1), 103-110.

Rama, D., & Andrews, J. D. (2013). A reliability analysis of railway switches. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J Rail and Rapid Transit,* 227(4), 344-363.

Russel, E. L., Chiang, L. H., & Braatz, R. D. (2000). Fault detection in industrial processes using canonical variate analysis and dynamic principal component analysis. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 51(1), 81-93.

Rusu, M. F. (2017). *Automation of railway switch and crossing inspection.* Birmingham: University of Birmingham.

Selivanova, A. (2018). *Tåg och järnvägar*. Hämtat 2019-02-19 från https://www.tekniskamuseet.se/lar-dig-mer/fordon-och-transport/tag-och-jarnvagar/.

Silmon, J. A., & Roberts, C. (2010). Improving railway switch system reliability with innovative condition monitoring algorithms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* 224, 293-302.

SIS. (2019). Underhåll - Terminologi (SS-EN 13306:2017). Hämtat från Swedish Standard Institute.

Trafikverket. (2012). *Användarhandbok för DS-Analys.* [interndokument].

Trafikverket. (2014). *Järnvägsnätsbeskrivning 2014.* Hämtat från https://www.trafikverket.se/contentassets/c6cd217cb1d54648a5729952b6c47634/jnb_2014_rev2_130914_130916.pdf

Trafikverket. (2018a). *Bandata*. Hämtat från Trafikverket 2019-02-19.

Trafikverket. (2018b). *Trafikverket.se*. Hämtat från Lupp uppföljningssystem: https://www.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/forvaltning-och-underhall/Lupp-uppfoljningssystem/

Trafikverket. (2019a). *Genomförda underhållsåtgärder 2011-2016*. Hämtat 2019-02-15 från https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall-av-vag-och-jarnvag/Sa-skoter-vi-jarnvagar/genomforda-underhallsatgarder-20112016/

Trafikverket. (2019b). *Kostnader för drift och underhåll*. Hämtat 2019-02-15 från https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall-av-vag-och-jarnvag/Sa-skoter-vi-jarnvagar/Kostnader-for-drift-och-underhall/

Trafikverksskolan. (2012). *Allmän järnvägsteknik för ingenjörer*.

Valuta.se. (2019-02-18). *Omvandlare*. Hämtat 2019-02-18 från https://www.valuta.se/.

Wang, W. (2000). A model to determine the optimal critical level. *International Journal of Production Research,* 38(6), 1425-1436.

Vanhatalo, E., & Bergquist, B. (2007). Special Considerations when Planning Experiments in a Continous Process. *Quality Engineering,* 19(3), 155-169.

Vanhatalo, E., Kulachi, M., & Bergquist, B. (2017). On the structure of dynamic principal component analysis used in statistical process monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,* 167, 1-11.

Wei, X., Jia, L., & Liu, H. (2012). Data-driven fault detection of vertical rail vehicle suspension systems. *UKACC international conference on control*, 589-594.

Woodward, J. L., & Pitbaldo, R. (2010). *LNG Risk Based Safety: modeling and consequence analysis.* John Wiley & Sons.

WSP. (2011). *Underlagsrapport.* Stockholm: WSP Sverige AB.

Bilagor

Bilaga A

Följande tabell visar de orsaks- respektive åtgärdsbeskrivningar för de spårväxlar vars identifierade tågstörande fel har orsakats av felande växellåda alternativt komponent tillhörande växellåda.

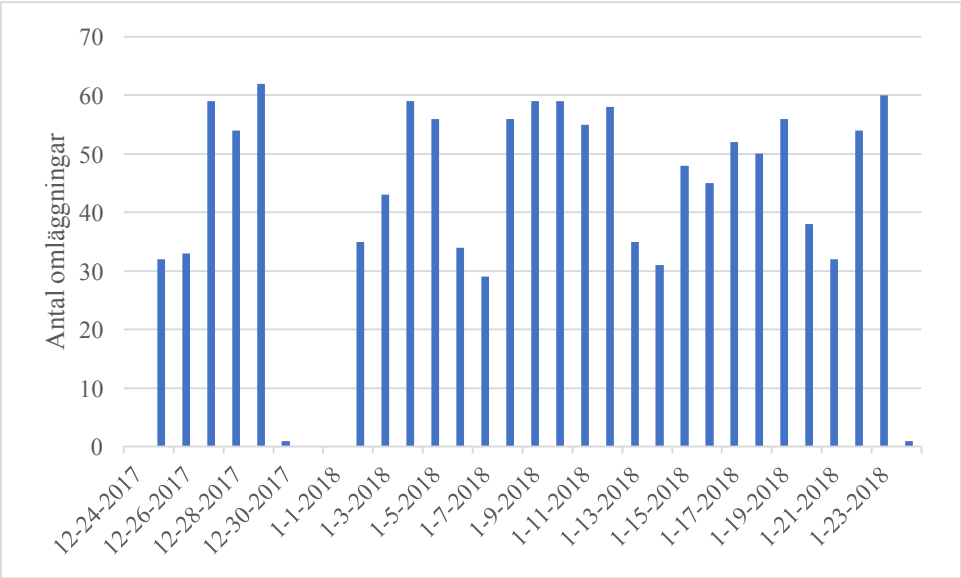
Bilaga A - tabell 1. Orsaks- och åtgärdsbeskrivningar.

Växel-individ	Orsaksbeskrivning	Åtgärdsbeskrivning	Merförsenings-minuter
Bål 113	Kugghjulsaxeln mellan vxllåda och draglinjalen har gått av/materialutmattning/dåligt gods	Bytt driv	29
Cst 421a	Dålig växellåda	Byte av växellåda och fyra stycken bultar. Justering av stag samt motorström	13
Cst 554b	Växellåda trasig.		14
Cst 581a	Växellåda i vxl 617 trasig		4
Duo 131a	Trasig Backgångsspärr	Vi bytte växellåda i Driv 2	0
Ep 131	Växellåda skuren i driv 1	Bytt växellåda i driv 1	7
Gn 132	Växellådan till driv 1 var sönder och ville inte gå om	Byte av växellåda	0
Ke 148a		Byte av vxllåda	11
Kmy 103	Materialutmattning troligtvis på vxl-lådorna och tre-kortet brann nog pga flera försök av omläggning/slirningar på vxl 106	Bytt vxl-låda och tre-kort till utdel. Bytt vxl låda i vxl 103 driv 1	2900
Lub 132		Byte av vxl låda	105
Skby 122	Driv 4, Trasig backgångsspärr i växellådan	Vi bytte växellåda till driv 72/73	0
So 1130	Växeln gick trögt pga dåligt fettade glidytor m.m. Motorn orkade ej med, och växellådans backgångsspärr var defekt så den byttes ut. Under felavhjälpning slutade även kontaktbleck 5-6 i handvevskontakten att fungera (mättes upp emot 24MOhm, så var nog p	Växellåda samt handvevskontakt bytt	167
Äs 724a	Säkringen går pga att motorn belastas då växellådan är trasig, diodbryggan har också gått sönder	Bytte växellåda, motor samt diodbrygga i växel 724b. I driv 2	0

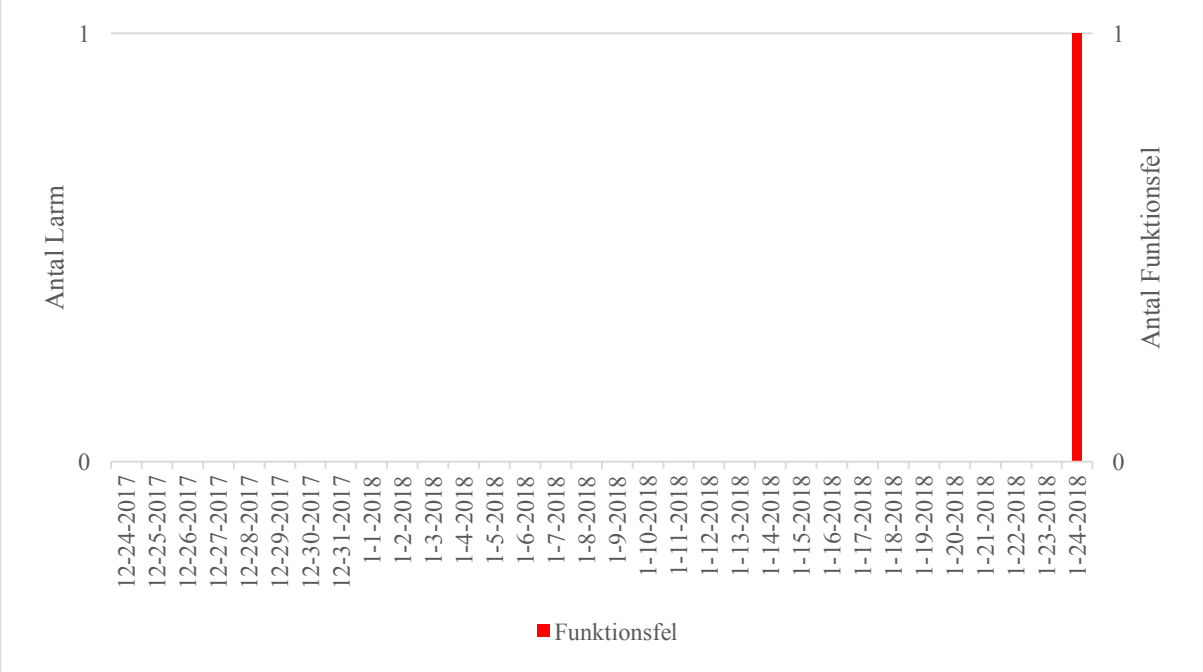
Bilaga B

Bål 113

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar frekvent, se Bilaga B - figur 1. Trots det registrerades inga larm innan funktionsfelet inträffade, se Bilaga B - figur 2.



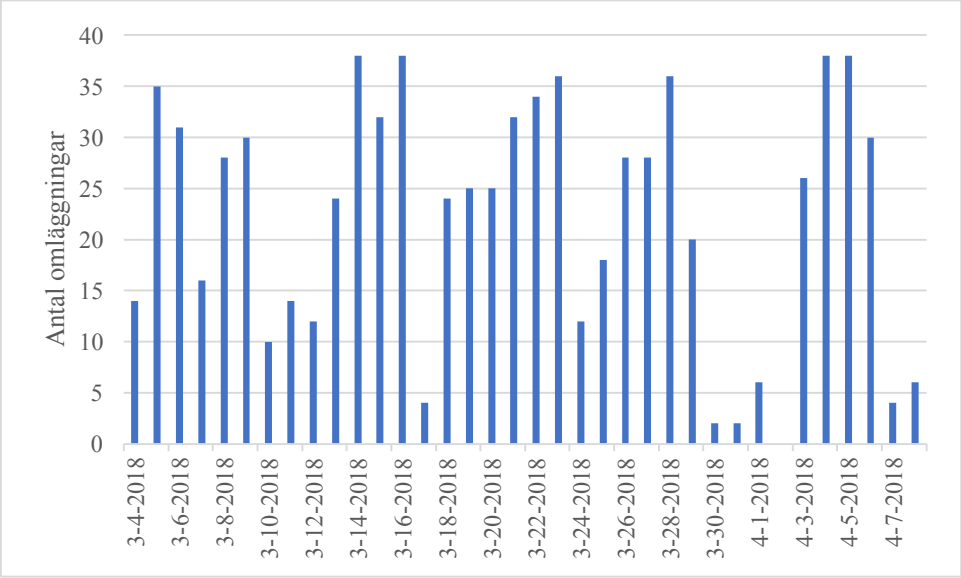
Bilaga B - figur 1. Omläggningar för Bål 113.



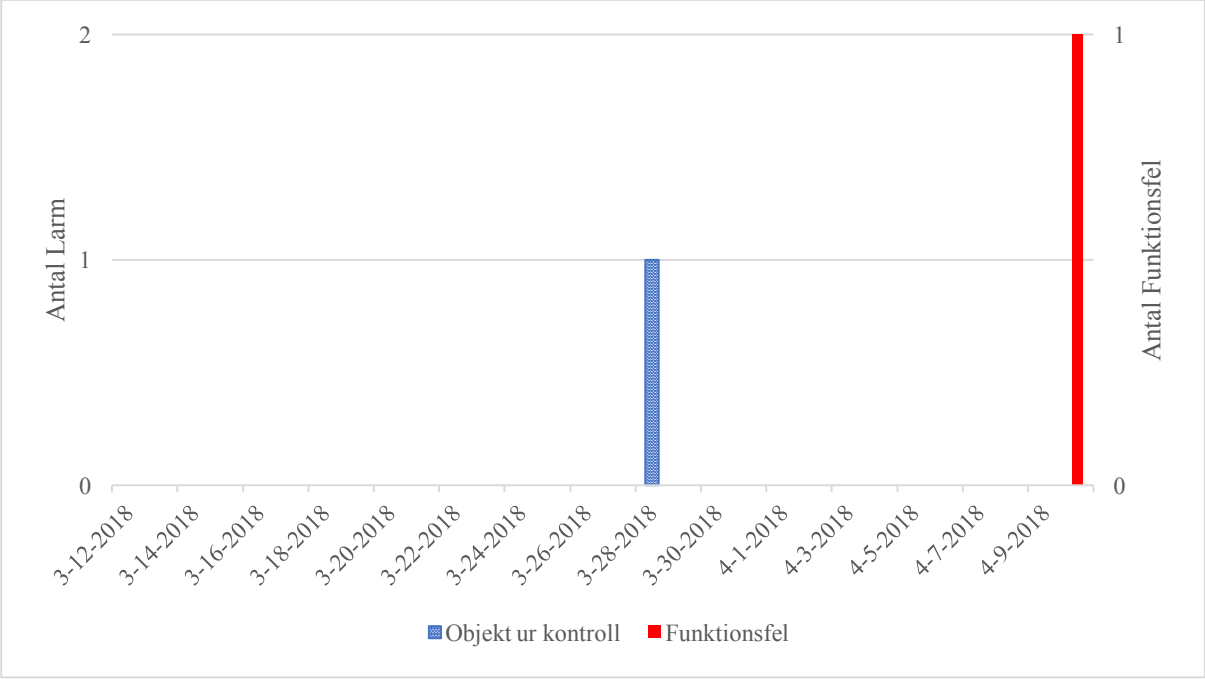
Bilaga B - figur 2. Larm och funktionsfel för Bål 113.

Cst 421a

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar frekvent, se Bilaga B - figur 3. Knappt två veckor innan funktionsfelet registrerades larmet *Objekt ur kontroll*, se Bilaga B - figur 4.



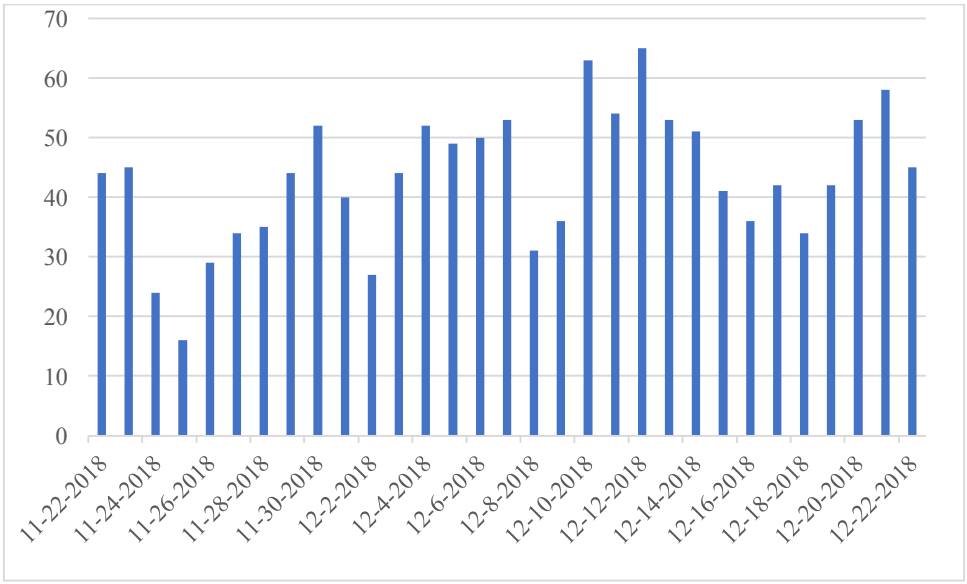
Bilaga B - figur 3. Omläggningar för Cst 421a.



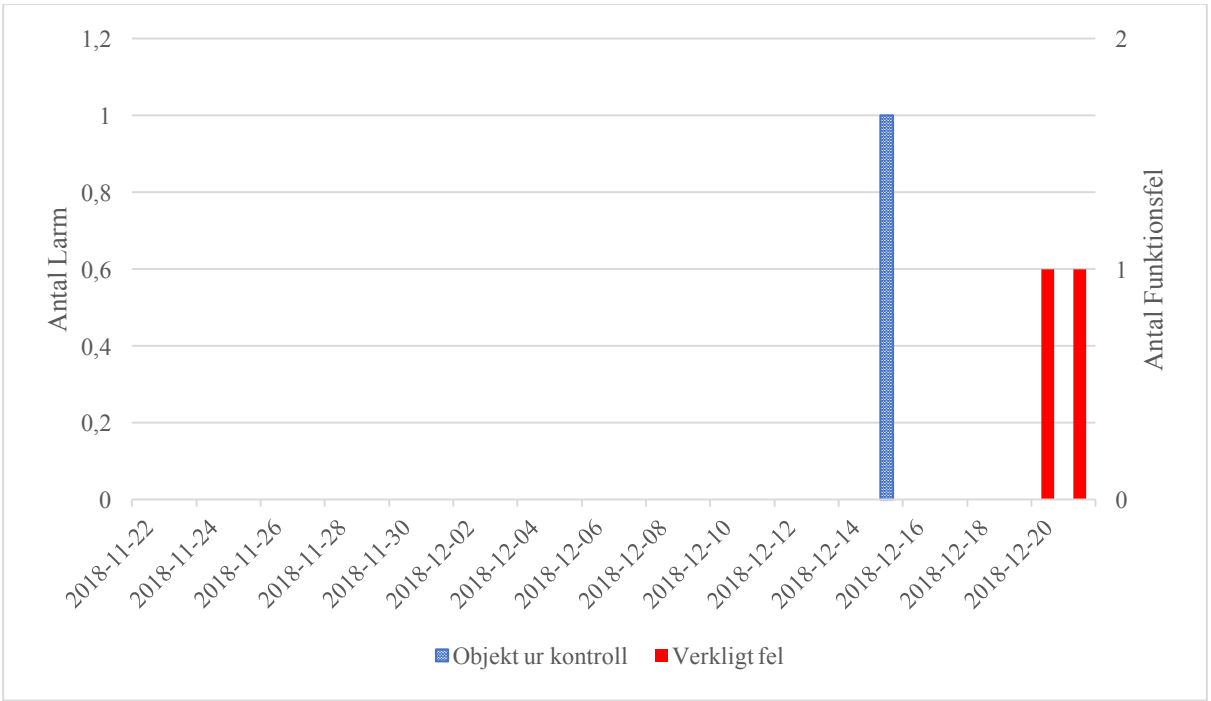
Bilaga B - figur 4. Larm och funktionsfel för Cst 421a.

Cst 554b

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar frekvent, se Bilaga B - figur 5. Knappt en vecka innan funktionsfelet registrerades *Objekt ur kontroll*, se Bilaga B - figur 6.



Bilaga B - figur 5. Omläggningar för Cst 554b.



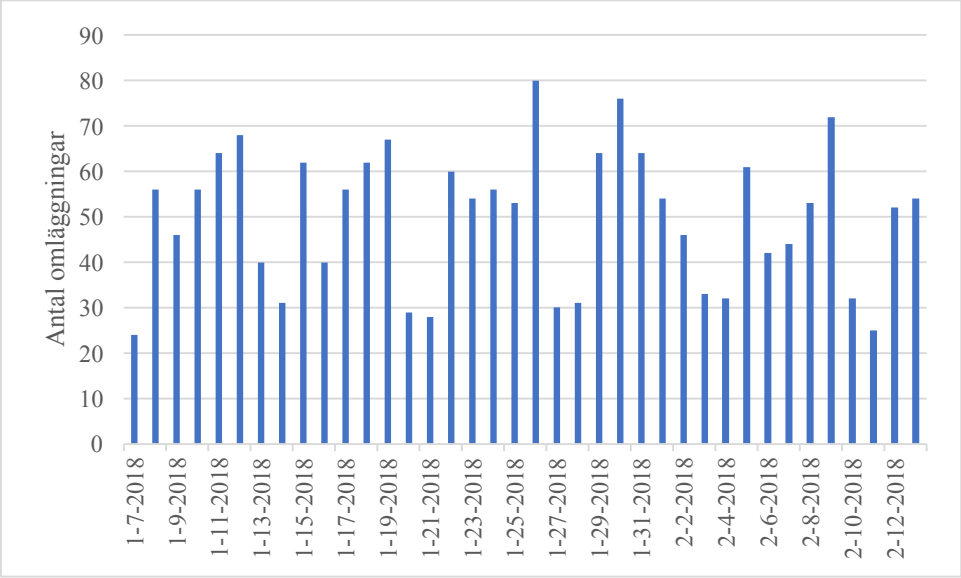
Bilaga B - figur 6. Larm och funktionsfel för Cst 554b.

Bilaga B - tabell 1. Beskrivning av funktionsfel för Cst 554b.

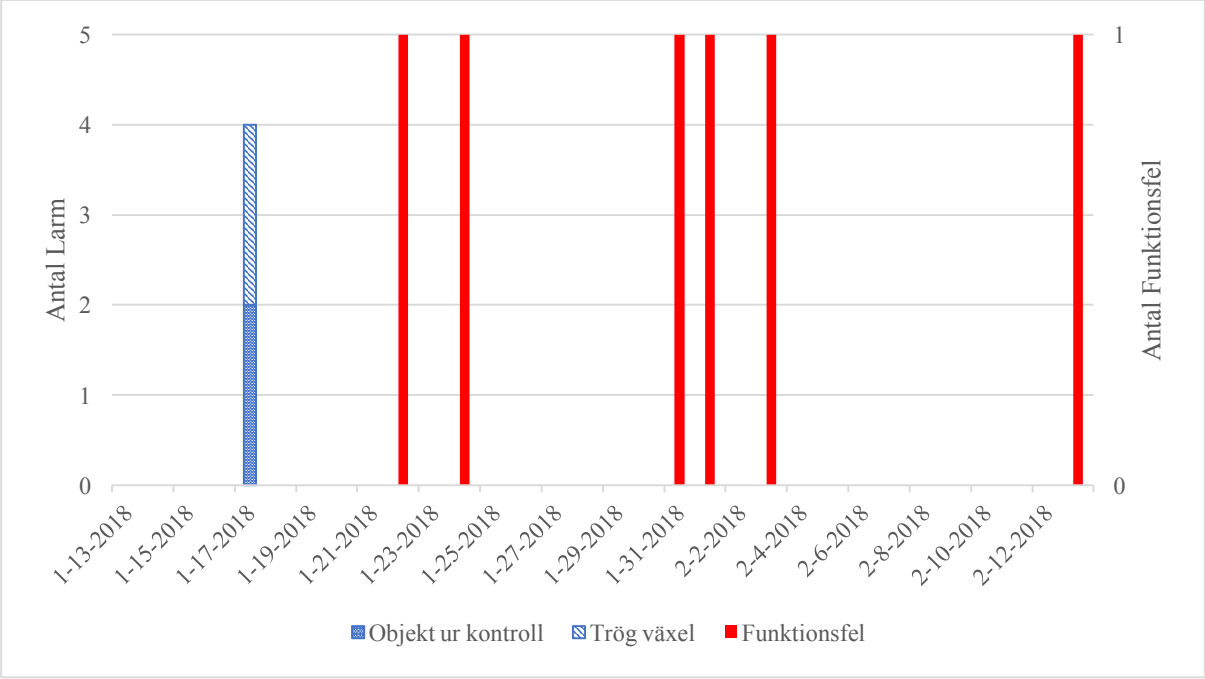
Anmält datum och tid	Orsak	Orsaksbeskrivning	Verkligt fel	Felbeskrivning	Åtgärdsbeskrivning
2018-12-20 23:14	Material-utmattning/ Åldrande	Trasig Växeldrivsmotor i 554B, Spårledning ej belagd vid felsökning, synat spår och mätt	Materialbrott	Växel 554 ur kontroll , samt Spl 528 belagd	Byte av Växeldrivsmotor samt provläggning. Spårledning mätt
2018-12-21 10:04	Material-utmattning/ Åldrande	Växellåda trasig.	Deformering	Växel 554 ej vänster	

Cst 581a

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar frekvent, se Bilaga B - figur 7. Knappt en månad innan funktionsfelet registrerades fyra larm, två *Objekt ur kontroll* och två *Trög växel,* se Bilaga B - figur 8.



Bilaga B - figur 7. Omläggningar för Cst 581a.



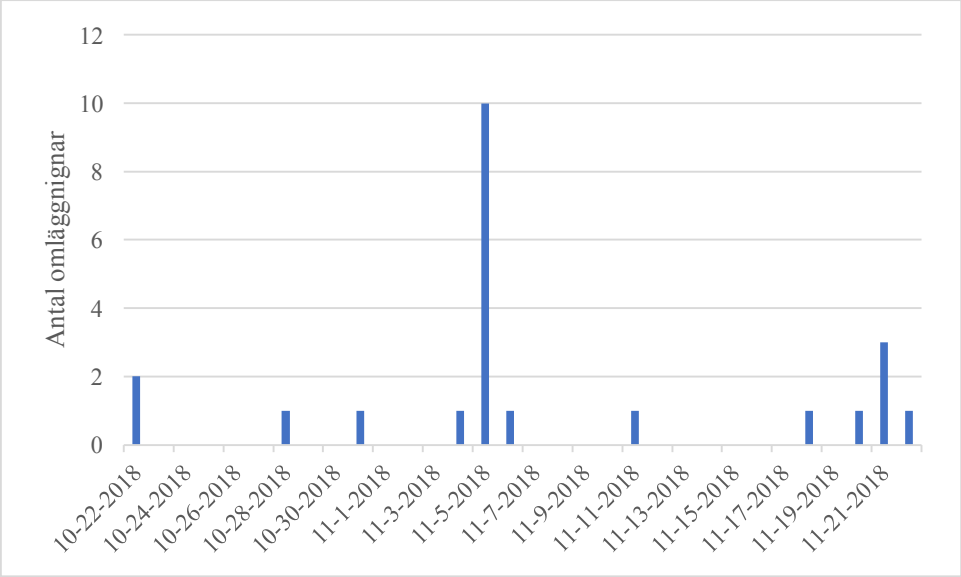
Bilaga B - figur 8. Larm och funktionsfel för Cst 581a.

Bilaga B - tabell 2. Beskrivning av funktionsfel för Cst 581a.

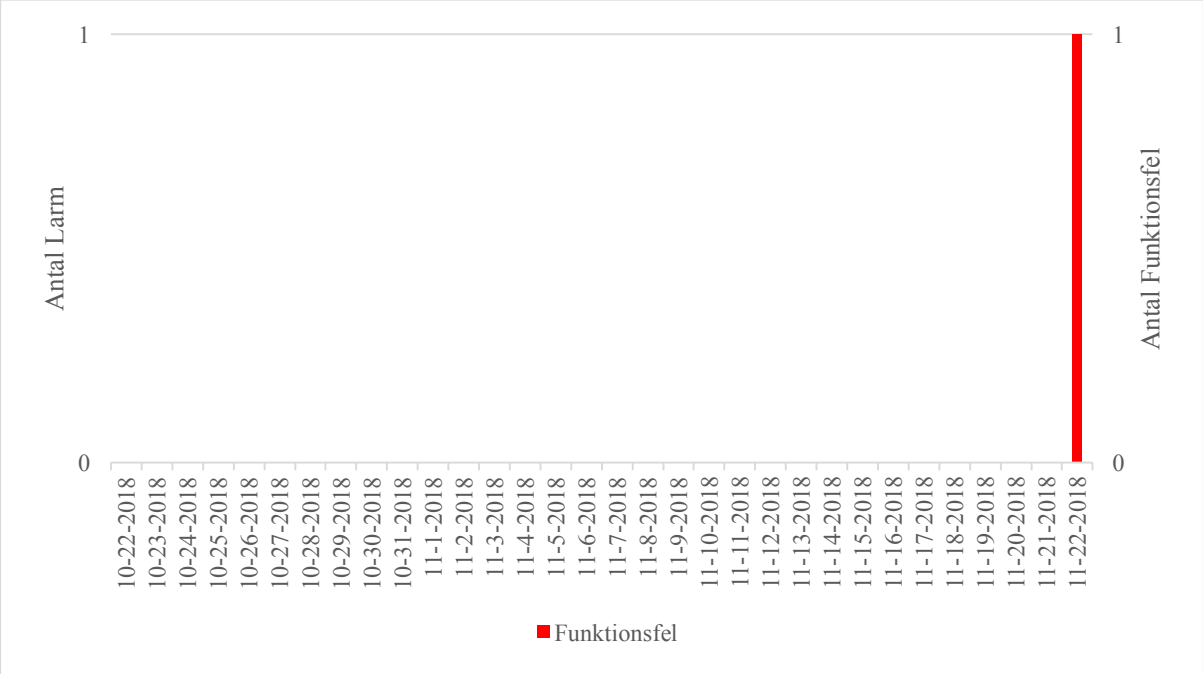
Anmält datum och tid	Orsak	Orsaksbeskrivning	Verkligt fel	Felbeskrivning	Åtgärdsbeskrivning
2018-01-22 14:30	Ingen känd orsak	växellådan hade låst sig på något sätt.	Ej möjligt att definiera	Gick ej till höger.	lättade lite på trycket sen fungerade den.
2018-01-24 20:19	Komponent trasig		Slitage	Motor trasig	
2018-01-31 18:45	Ingen känd orsak		Inget fel		
2018-02-01 06:50	Material-utmattning/ Åldrande	Trasig motor	Materialbrott	cst 617 ej vä	
2018-02-03 15:40	Fel inställning	För hög friktion	Ej möjligt att definiera	Vxl 617 ej vänster.	Sänkt friktionen
2018-02-13 22:30	Material-utmattning/ Åldrande	växellåda i vxl 617 trasig	Ej möjligt att definiera	vxl 617 ej höger	

Duo 131a

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar, se Bilaga B - figur 9. Trots det registrerades inga larm innan funktionsfelet inträffade, se Bilaga B - figur 10.



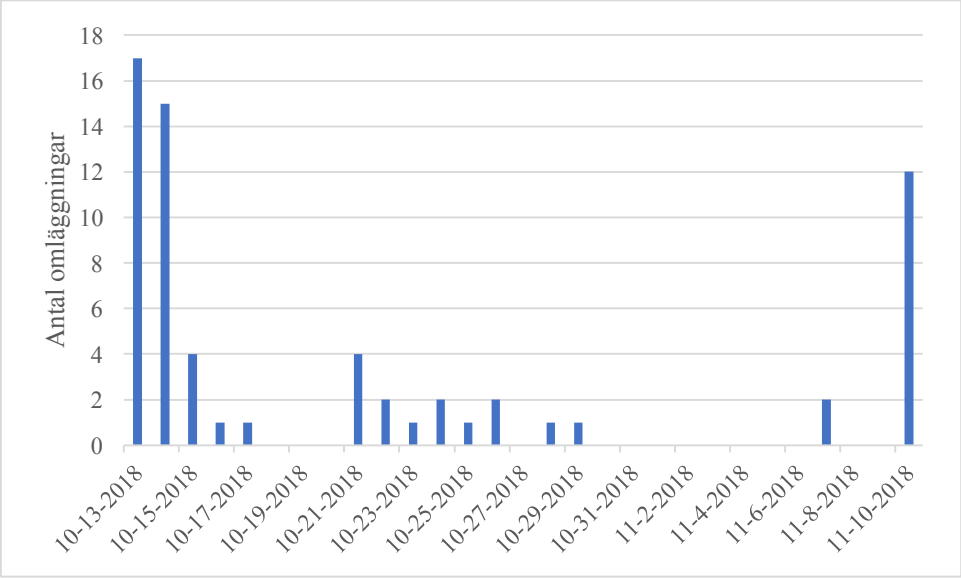
Bilaga B - figur 9. Omläggningar för Duo 131a.



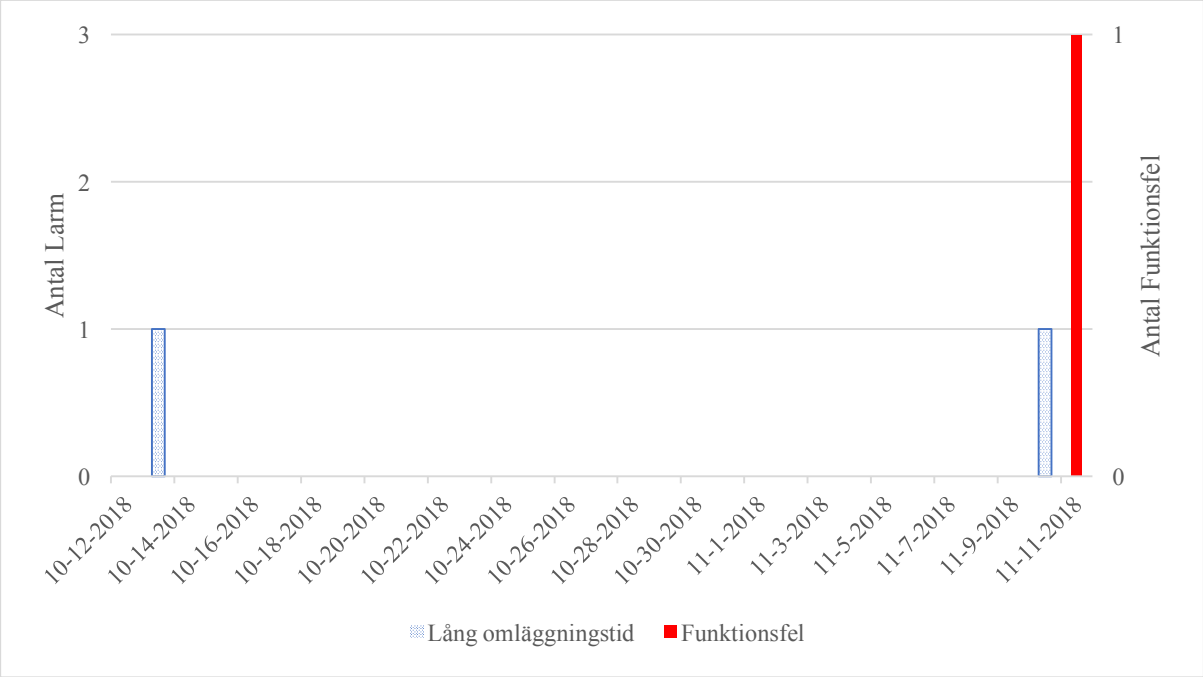
Bilaga B - figur 10. Larm och funktionsfel för Duo 131a.

Ep 131

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar, se Bilaga B - figur 11. Knappt en månad innan funktionsfelet inträffade registrerades larmet *Lång omläggningstid* och dagen innan funktionsfelet registrerades larmet *Lång omläggningstid*, se Bilaga B - figur 12.



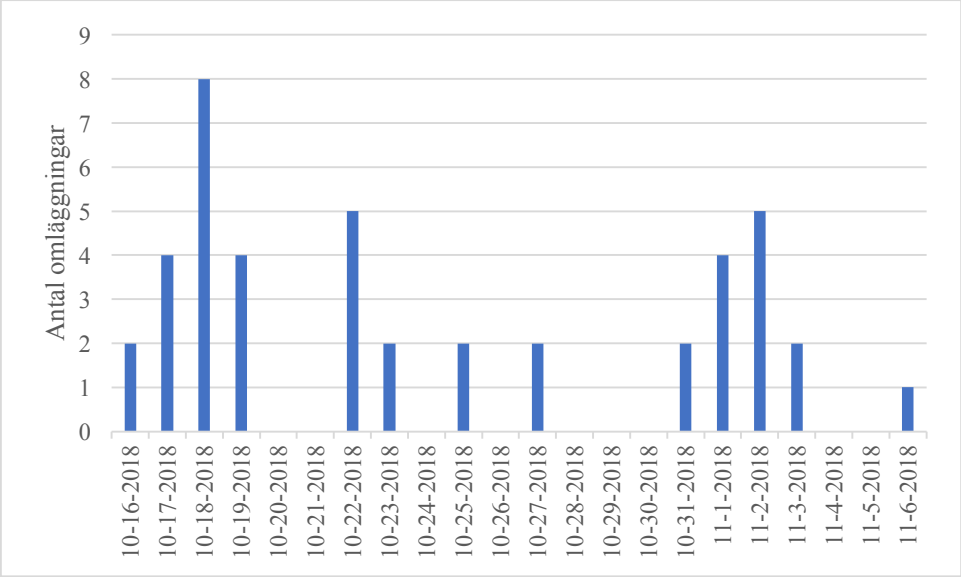
Bilaga B - figur 11. Omläggningar för Ep 131.



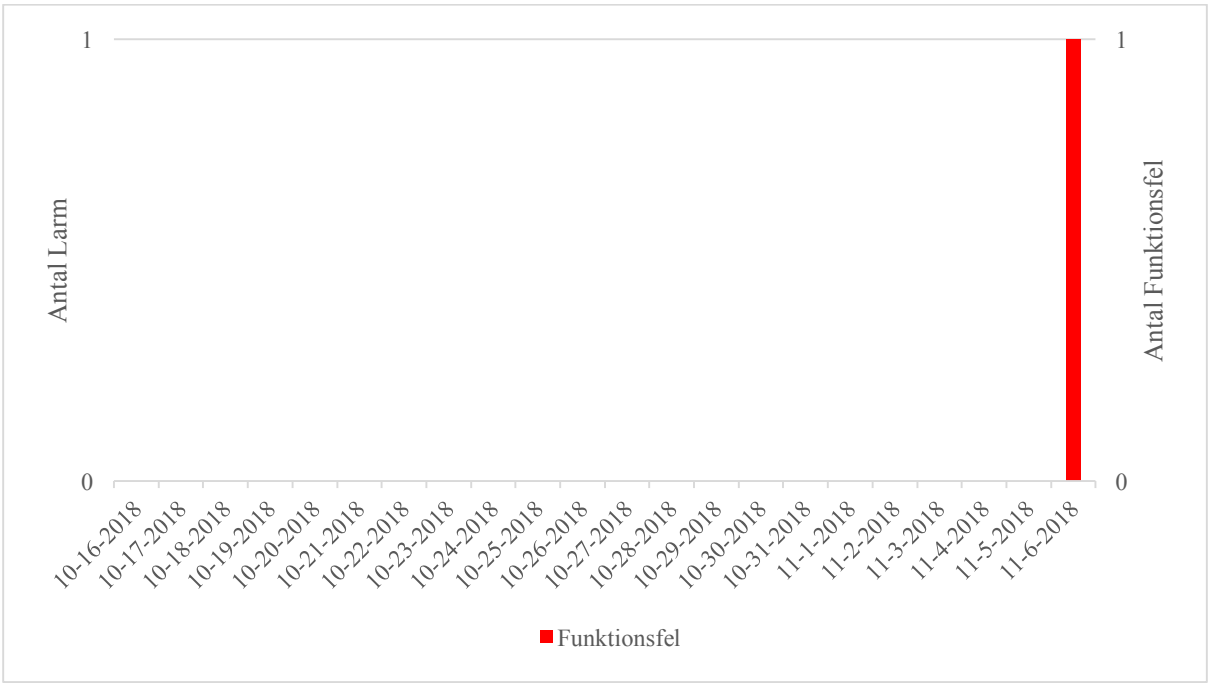
Bilaga B - figur 12. Larm och funktionsfel för Ep 131.

Gn 132

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar, se Bilaga B - figur 13. Trots det registrerades inga larm innan funktionsfelet inträffade, se Bilaga B - figur 14.



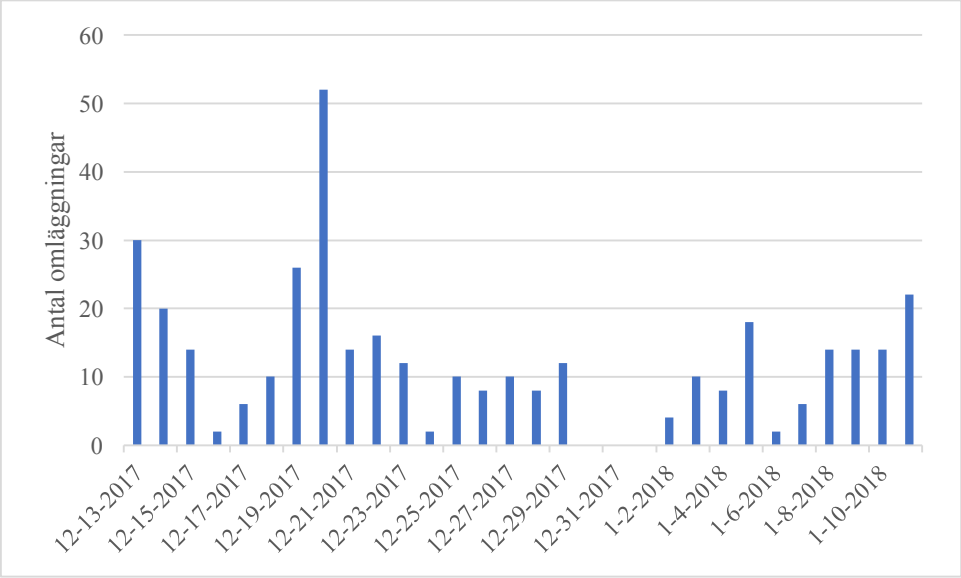
Bilaga B - figur 13. Omläggningar för Gn 132.



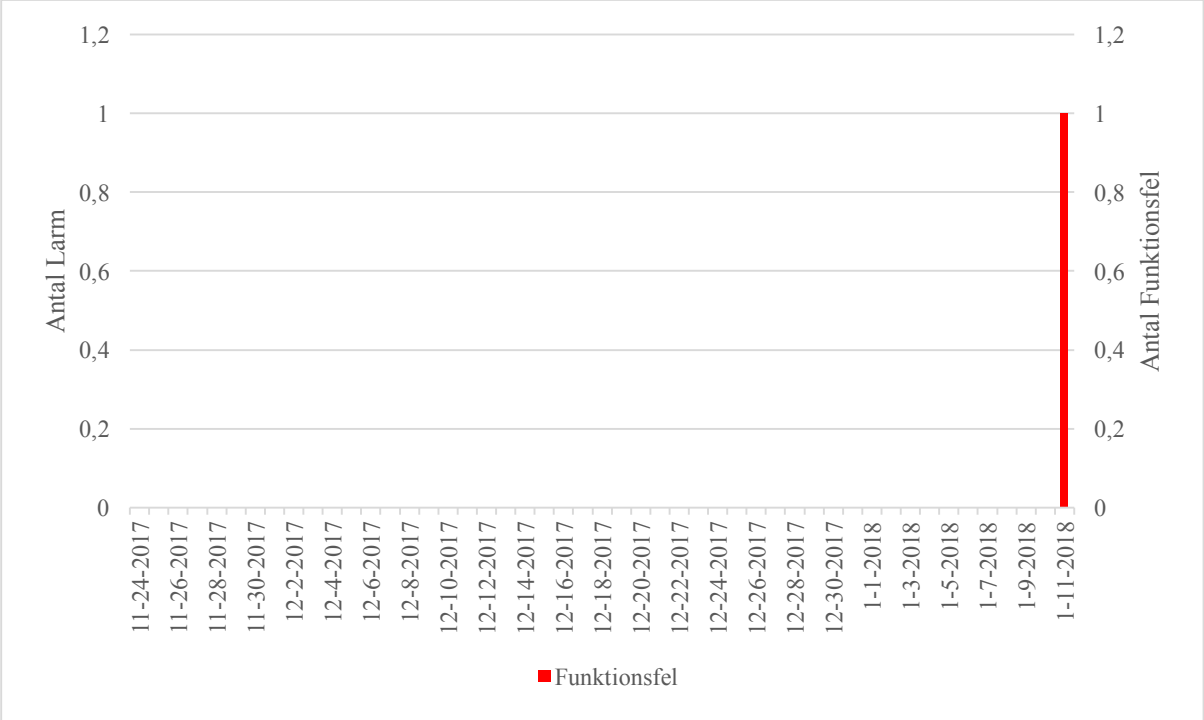
Bilaga B - figur 14. Larm och funktionsfel för Gn 132.

Ke 148a

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar frekvent, se Bilaga B - figur 15. Trots det registrerades inga larm innan funktionsfelet inträffade, se Bilaga B - figur 16.



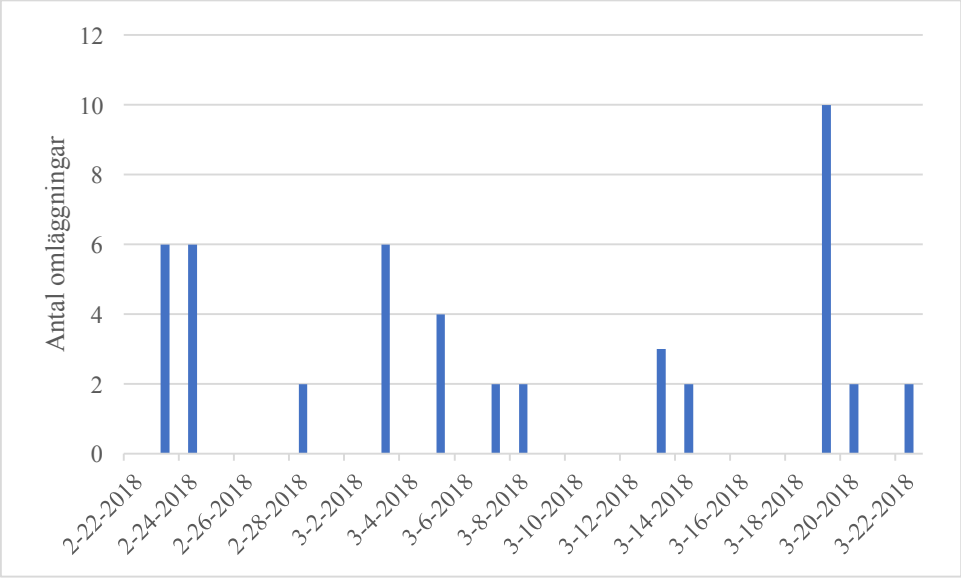
Bilaga B - figur 15. Omläggningar för Ke 148a.



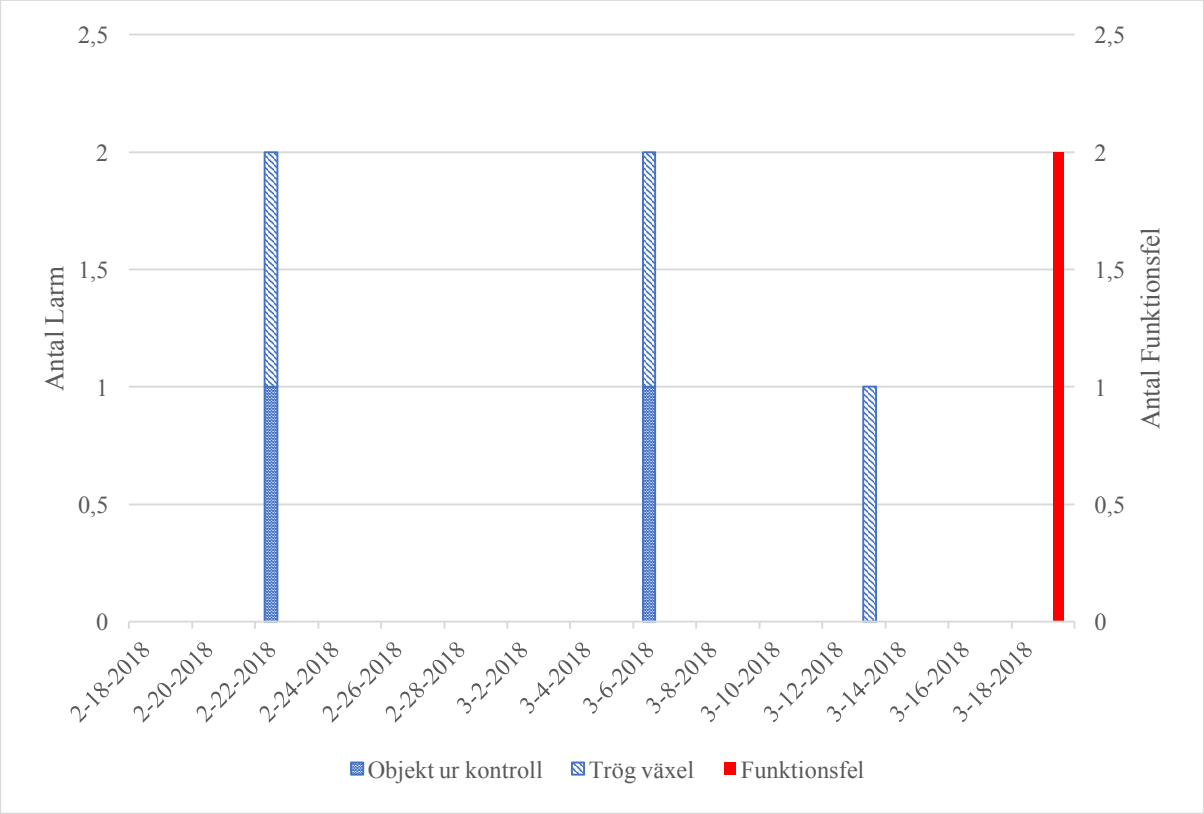
Bilaga B - figur 16. Larm och funktionsfel för Ke 148a.

Kmy 103

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar, se Bilaga B - figur 17. Vid tre tillfällen under månaden innan funktionsfelet registrerades totalt sex larm, ett *Kort bortfall,* två *Objekt ur kontroll* och tre *Trög växel,* se Bilaga B - figur 18.



Bilaga B - figur 17. Omläggningar för Kmy 103.



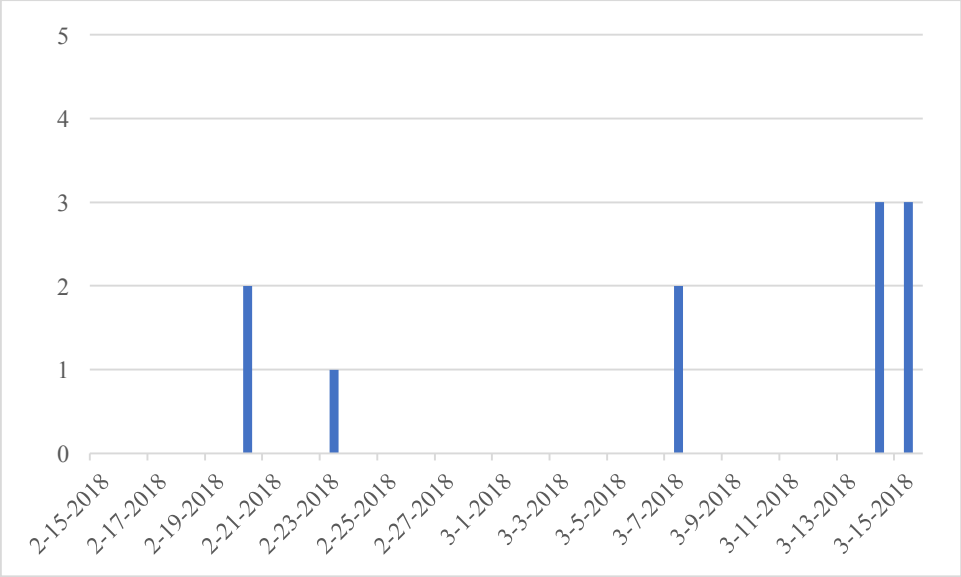
Bilaga B - figur 18. Larm och funktionsfel för Kmy 103.

Bilaga B - tabell 3. Beskrivning funktionsfel Kmy 103

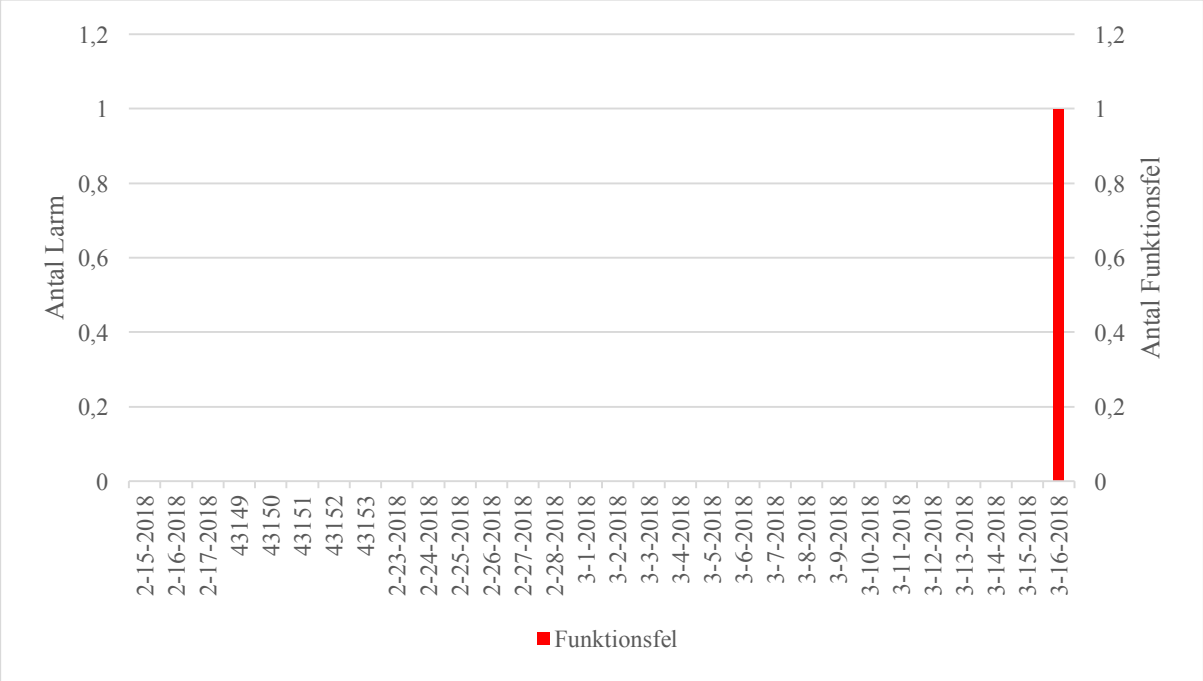
Anmält datum och tid	Orsak	Orsaksbeskrivning	Verkligt fel	Felbeskrivning	Åtgärdsbeskrivning
2018-03-19 07:31	Främmande föremål	Makadam mellan tunga/stödräl vid TKK 4	Dålig kontakt		
2018-03-19 18:51	Materialutmattning/Åldrande	Matrialutmattning troligtvis på vxl-lådorna och tre-kortert brann nog pga flera försök av omläggning/slirningar på vxl 106.	Materialbrott	Vxl 106 ur kontroll, tre-kort brunnit och vxl-låda trasig.Även vxl 103 ur kontroll och ej omläggningsbar pga trasig vxl-låda.	Bytt vxl-låda i vxl 106 driv 1 och tre-kort till utdel. Bytt vxl låda i vxl 103 driv 1.

Lub 132

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar, se Bilaga B - figur 19. Trots det registrerades inga larm innan funktionsfelet inträffade, se Bilaga B - figur 20.



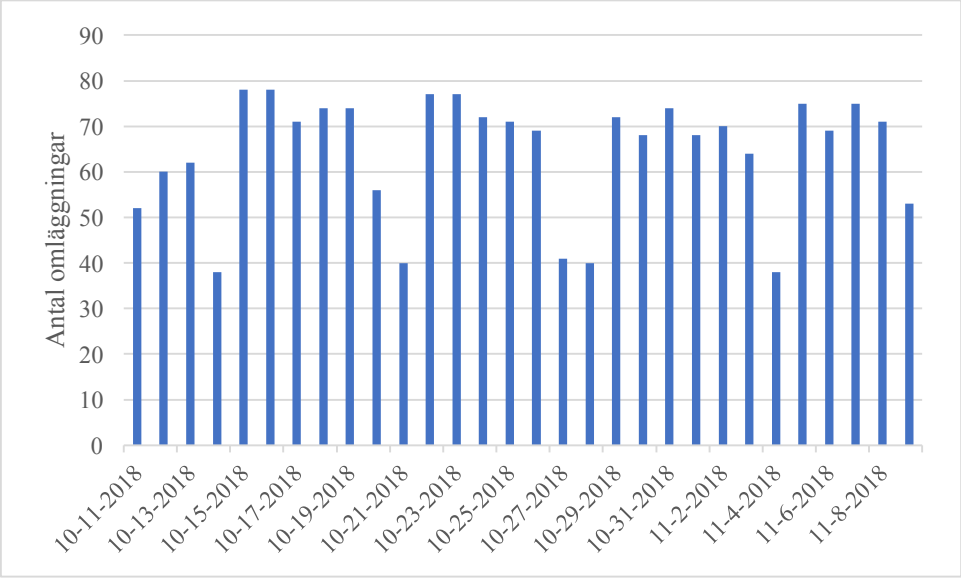
Bilaga B - figur 19. Omläggningar för Lub 132.



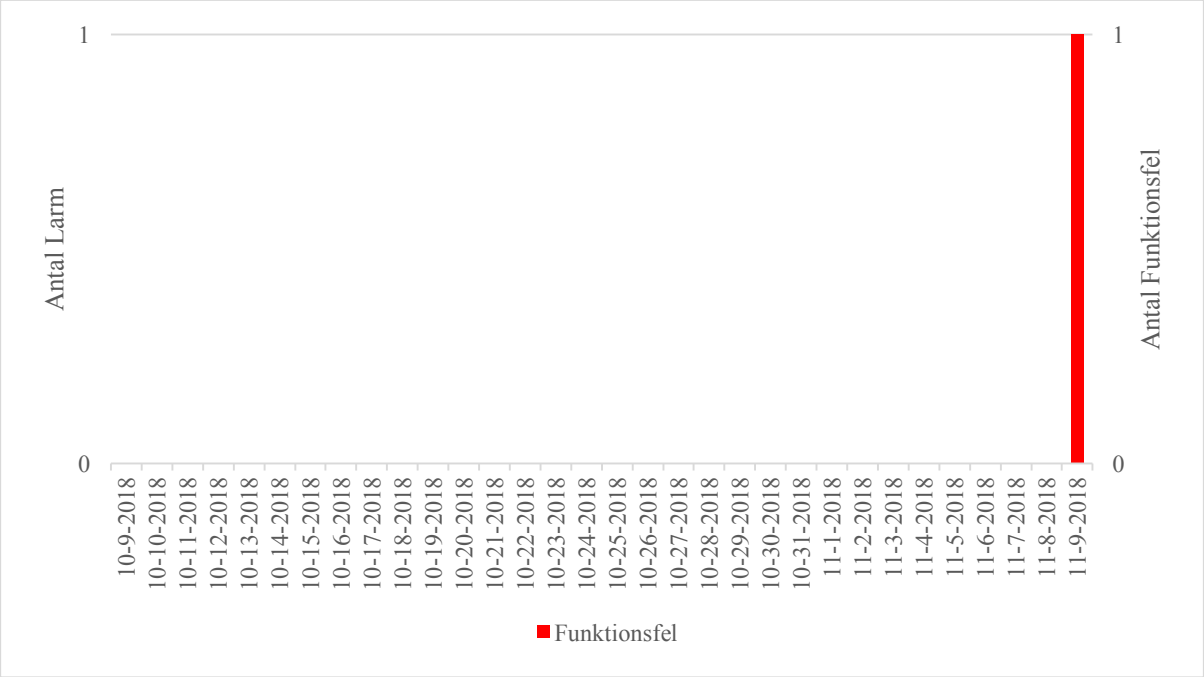
Bilaga B - figur 20. Larm och funktionsfel för Lub 132.

Skby 122

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar frekvent, se Bilaga B - figur 21. Trots det registrerades inga larm innan funktionsfelet inträffade, se Bilaga B - figur 22.



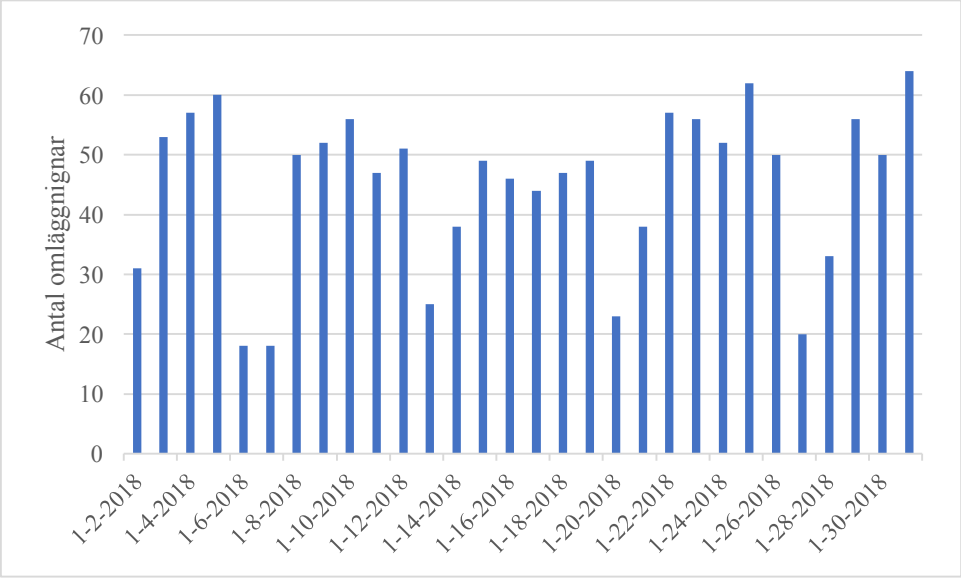
Bilaga B - figur 21. Omläggningar för Skby 122.



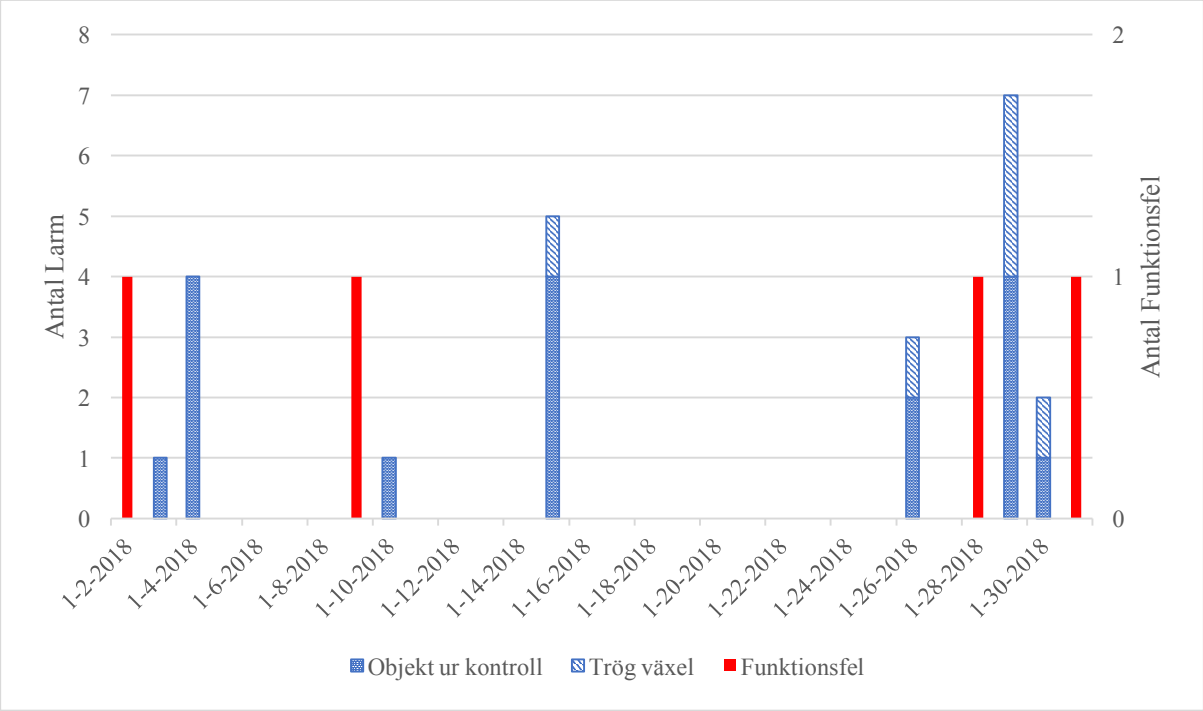
Bilaga B - figur 22. Larm och funktionsfel för Skby 122.

So 1130

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar frekvent, se Bilaga B - figur 23. Månaden innan funktionsfelet registrerades vid flera tillfällen totalt 35 larm, 7 *Kort bortfall,* 5 *Långt bortfall,* 17 *Objekt ur kontroll* och 6 *Trög växel,* se Bilaga B - figur 24.



Bilaga B - figur 23. Omläggningar för So 1130.



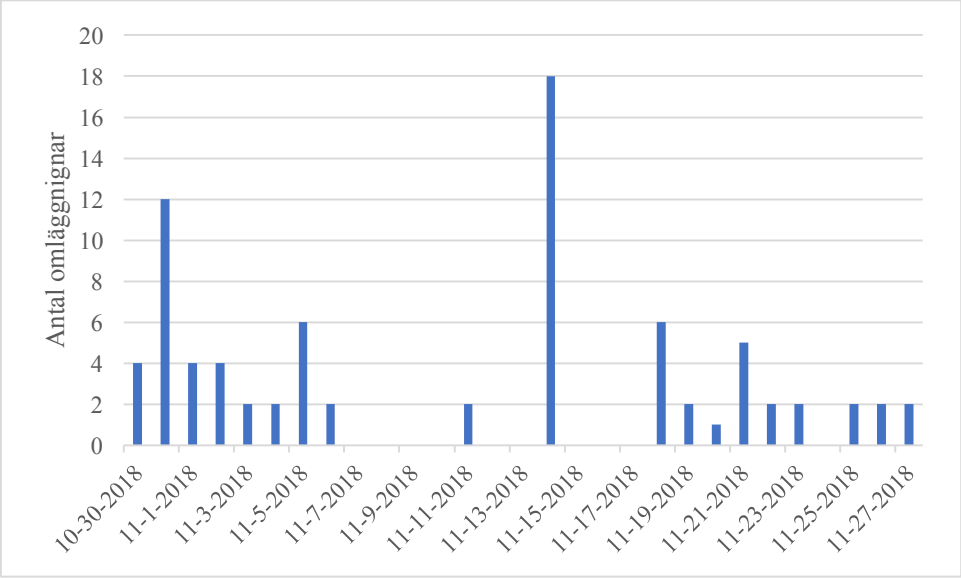
Bilaga B - figur 24. Larm och funktionsfel för So 1130.

Bilaga B - tabell 4. Beskrivning av funktionsfel för So 1130

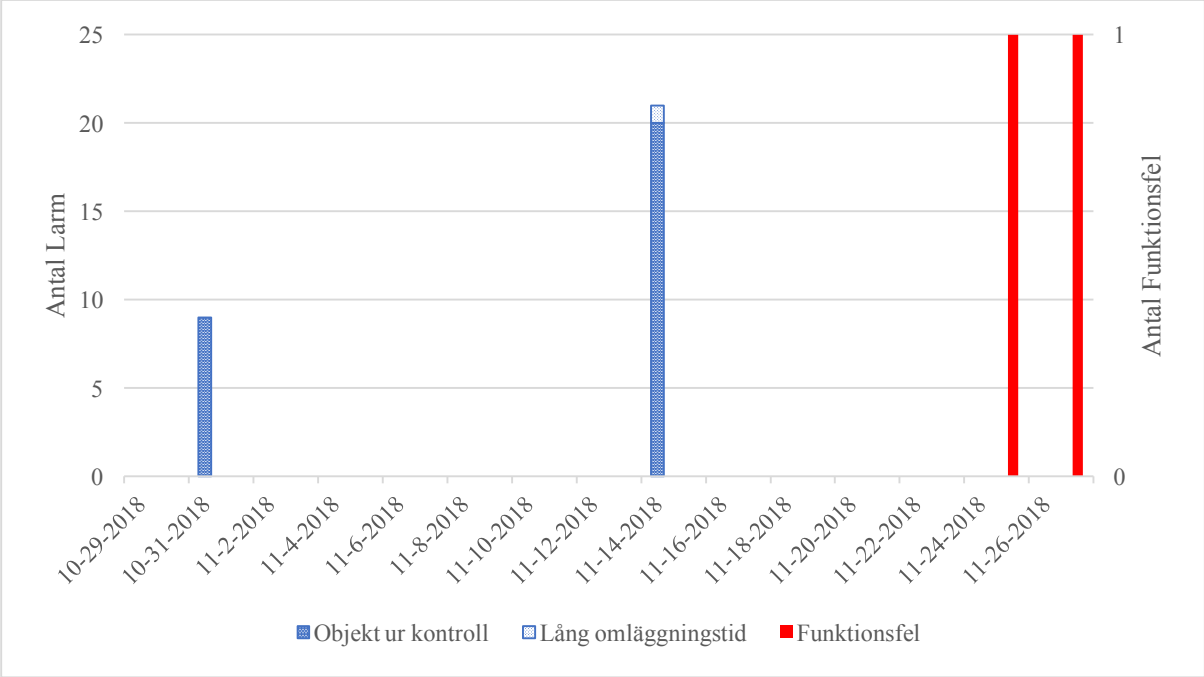
Anmält datum och tid	Orsak	Orsaksbeskrivning	Verkligt fel	Felbeskrivning	Åtgärdsbeskrivning
2018-01-02 16:34	Material-utmattning/ Åldrande	motor la av.	Slitage	vxl 1130 ej v.	
2018-01-09 07:25	Ingen känd orsak	felet försvann	Ej möjligt att definiera	Jordfel i vxl 1130	
2018-01-28 13:15	Komponent trasig		Avbrott		
2018-01-31 22:33	Bristfälligt underhåll	Växeln gick trögt pga dåligt fettade glidytor m.m. Motorn orkade ej med, och växellådans backgångsspärr var defekt så den byttes ut. Under felavhjälpningen slutade även kontaktbleck 5-6 i handvevskontakten att fungera (mättes upp emot 24MOhm, så var nog p	Ej möjligt att definiera	Växel 1130 i Solna ej kontroll i vänsterläge.	Växellåda samt handvevskontakt bytt.

Äs 724a

Under månaden innan funktionsfelet inträffade gjordes omläggningar, se Bilaga B - figur 25. Månaden innan funktionsfelet registrerades 36 larm, 6 *Långt bortfall*, 29 *Objekt ur kontroll* och en *Lång omläggningstid*, se Bilaga B - figur 26.



Bilaga B - figur 25. Omläggningar för Äs 724a.

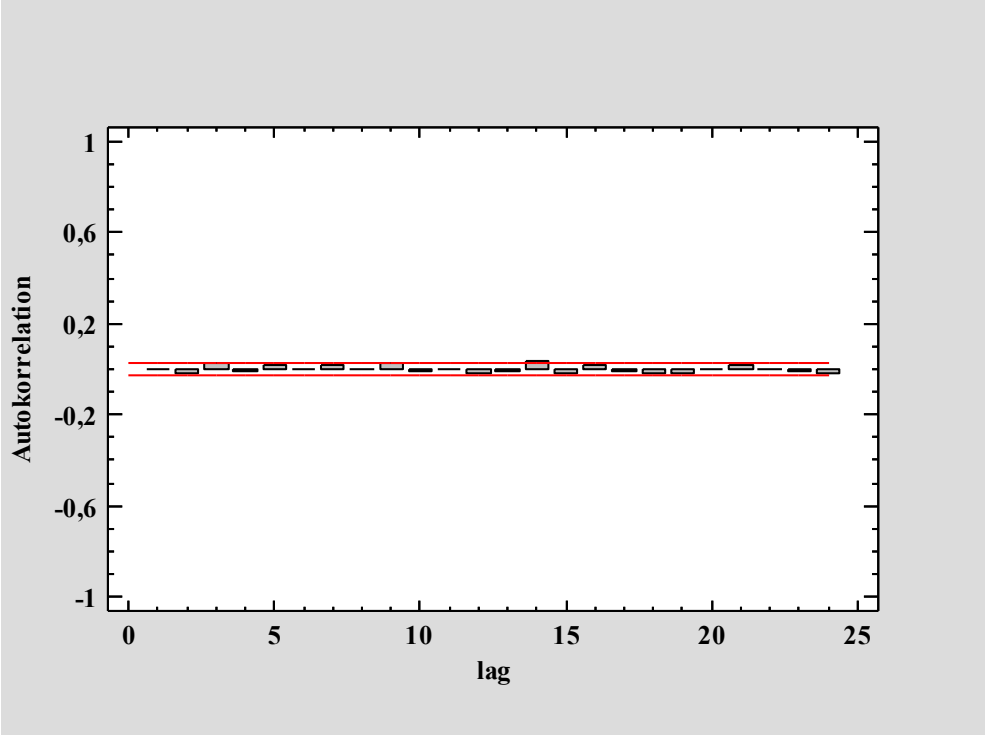


Bilaga B - figur 26. Larm och funktionsfel för Äs 724a.

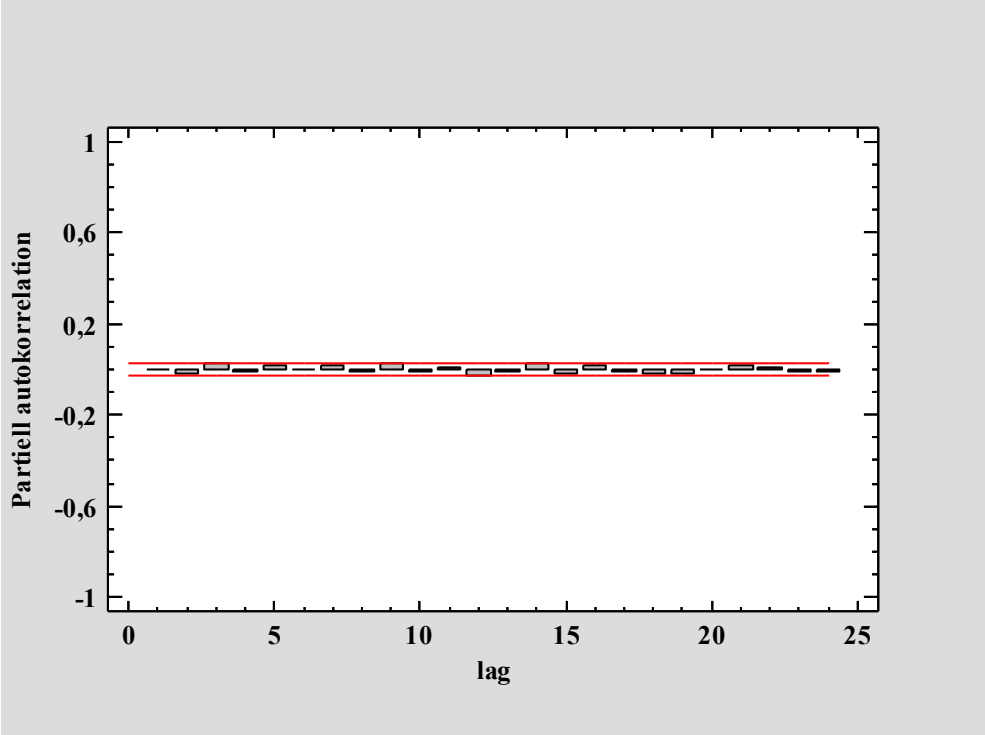
Anmält datum och tid	Orsak	Orsaksbeskrivning	Verkligt fel	Felbeskrivning	Åtgärdsbeskrivning
2018-11-25 22:15	Ingen känd orsak	motor la av.	Kortslutning	Säkring gick i växel 724 vid omläggning.	Återställning av säkring.
2018-11-27 05:29	Komponent trasig	Säkringen går pga att motorn belastas då växellådan är trasig, diodbryggan hade också gått sönder.	Slitage	Säkringslarm går när man lägger om växel 724.	Byte av växellåda, motor samt diodbrygga i växel 724b. I driv 2.

Bilaga C

Bål 113 autokorrelation 3 månader innan fas 2

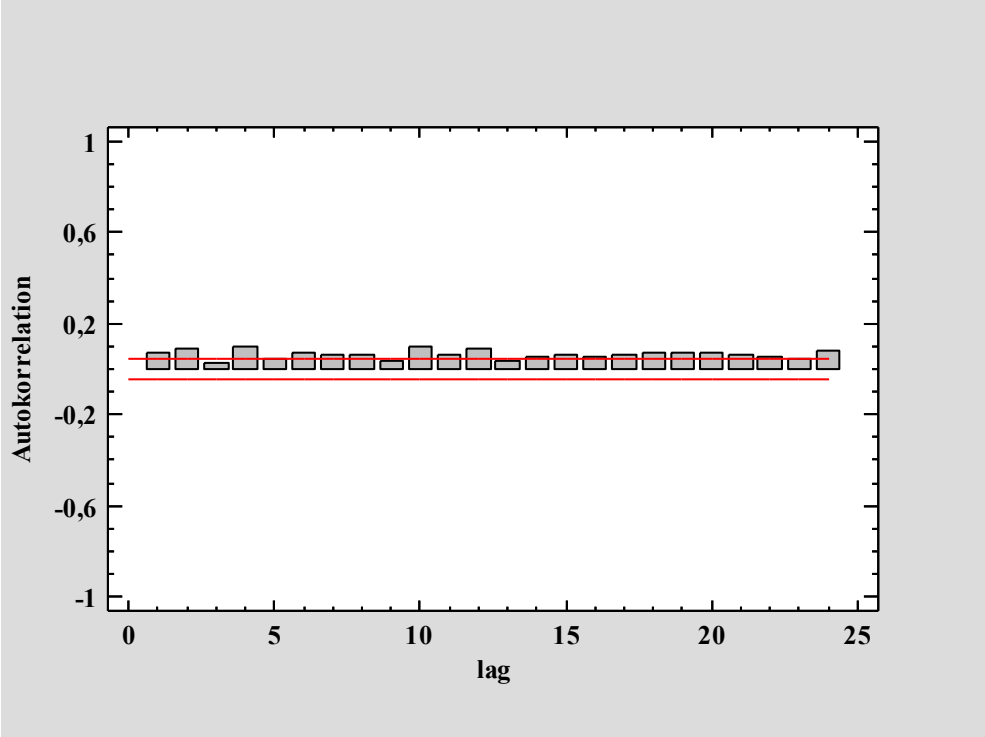


Bilaga C - figur 1. Bål 113 ACF 3 månader innan fas 2

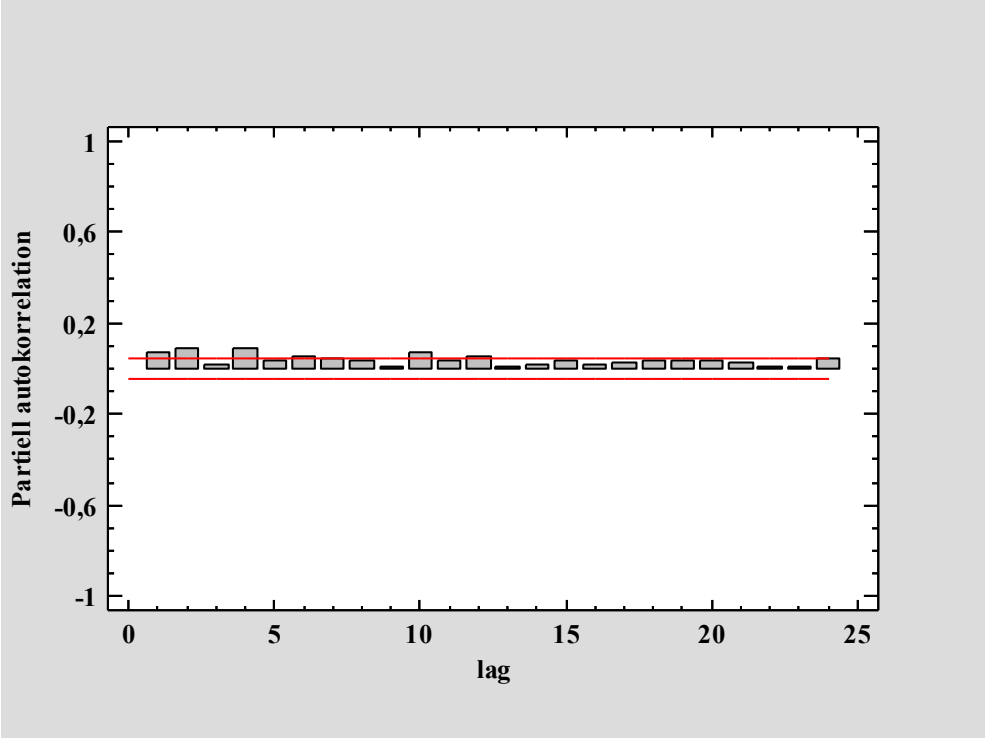


Bilaga C - figur 2. Bål 113 PACF 3 månader innan fas 2

Cst 421a autokorrelation 3 månader innan fas 2



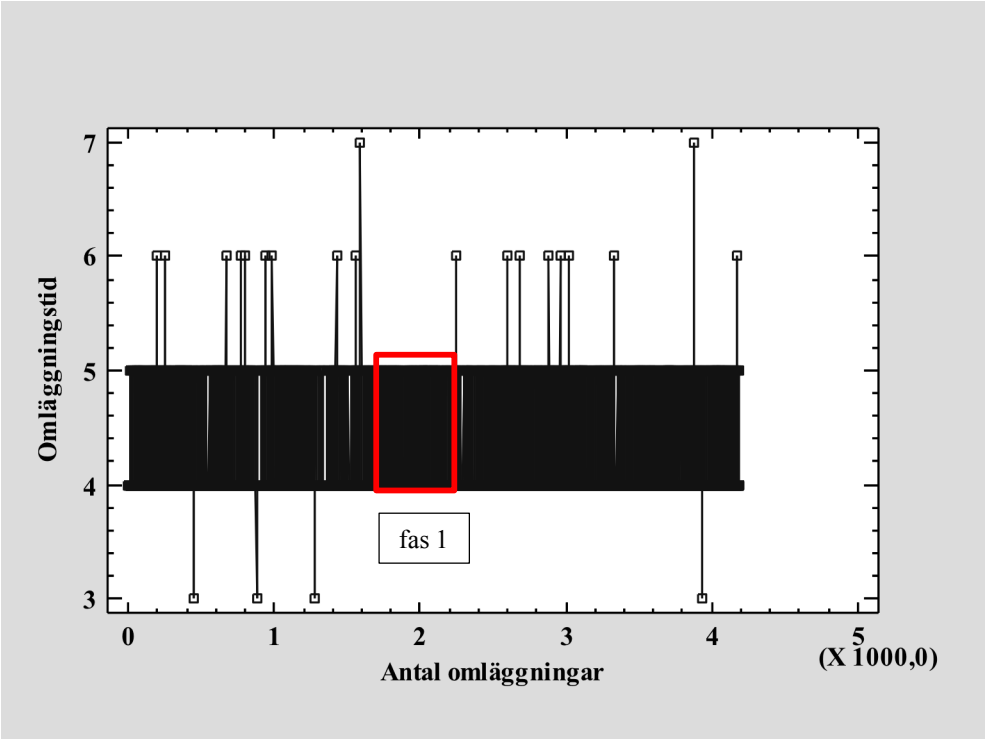
Bilaga C - figur 3. Cst 421a ACF 3 månader innan fas 2



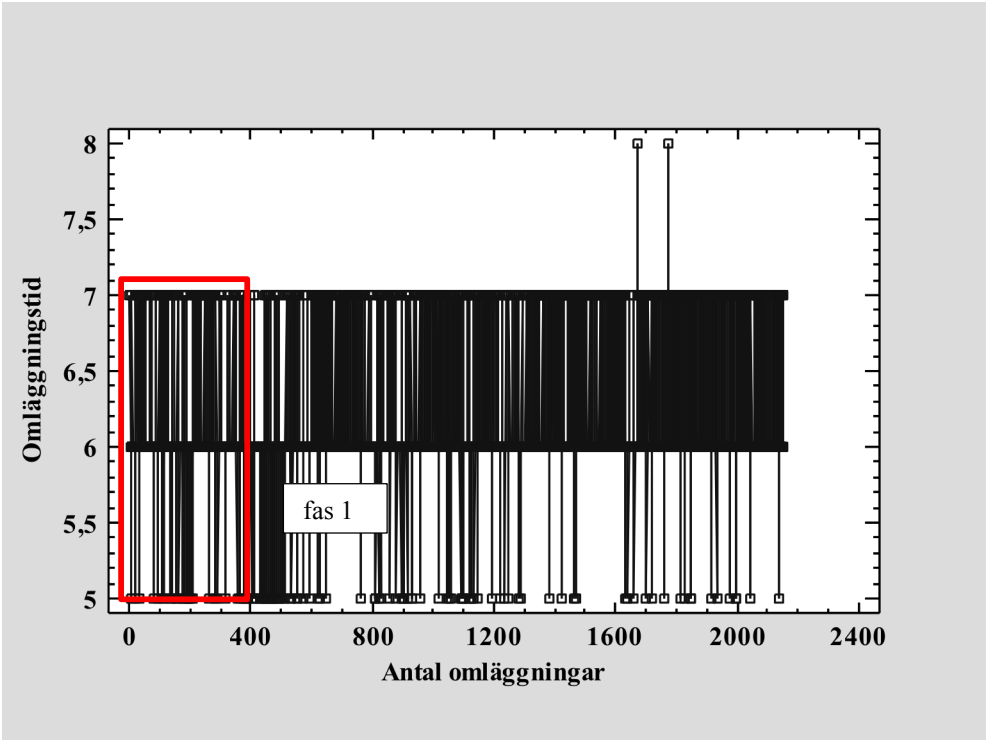
Bilaga C - figur 4. Cst 421a PACF 3 månader innan fas 2

Bilaga D

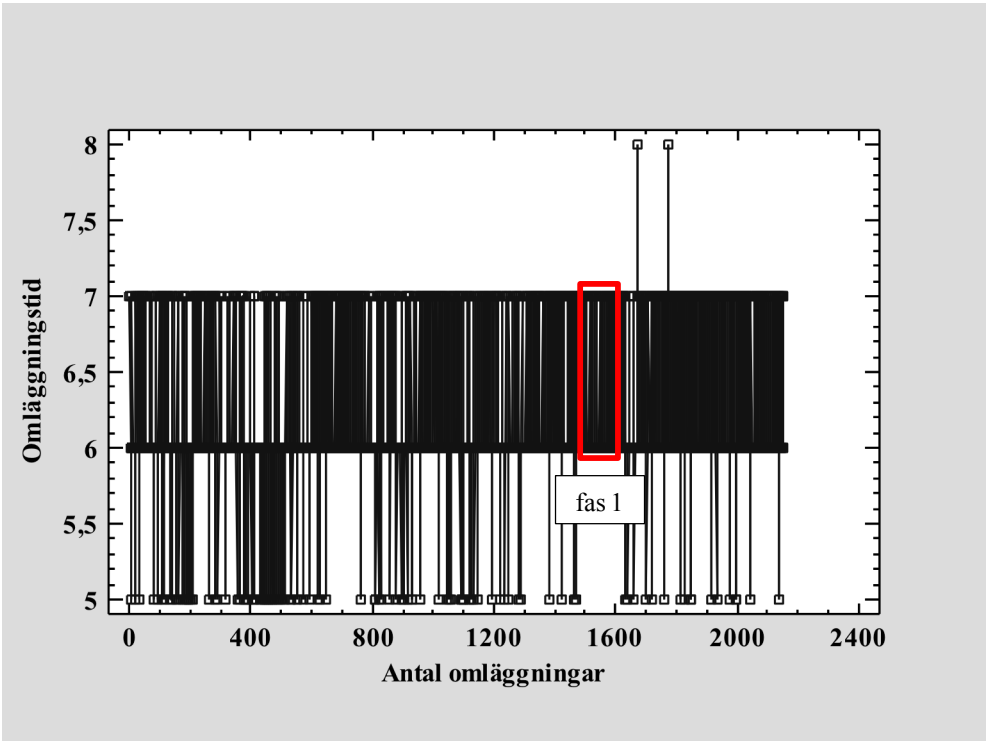
Denna bilaga beskriver de perioder som valdes som fas 1 för spårväxel Bål 113 och Cst 421a. Röd rektangel markerar vald fas 1.



Bilaga D - figur 1. Bål 113 fas 1



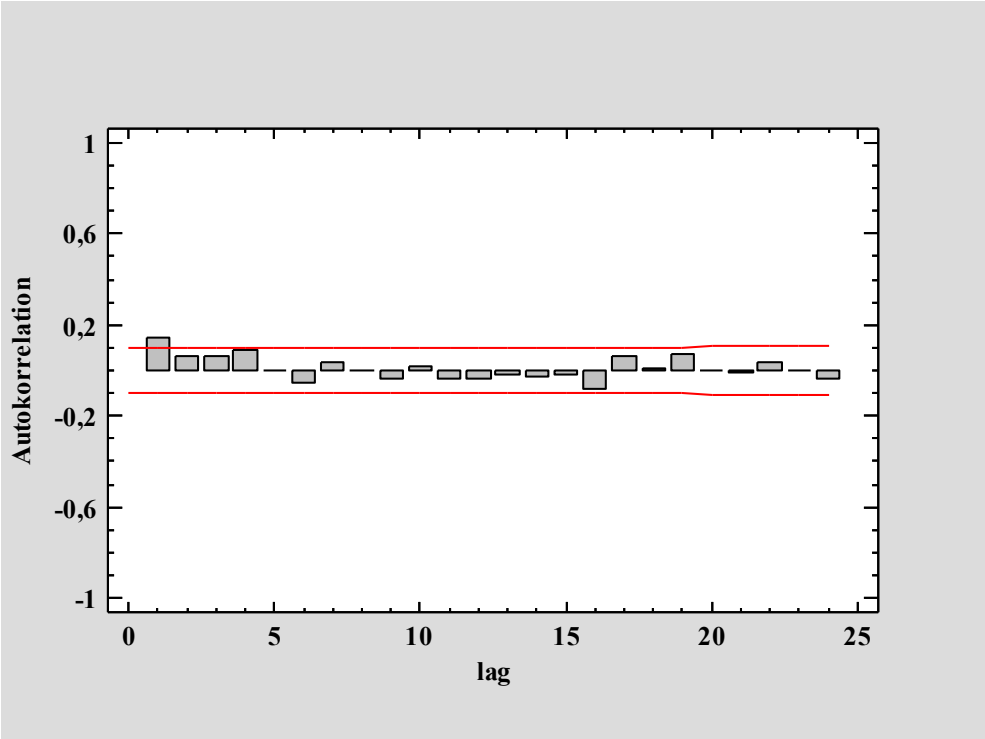
Bilaga D - figur 2. Cst 421a med de 400 första mätvärdena



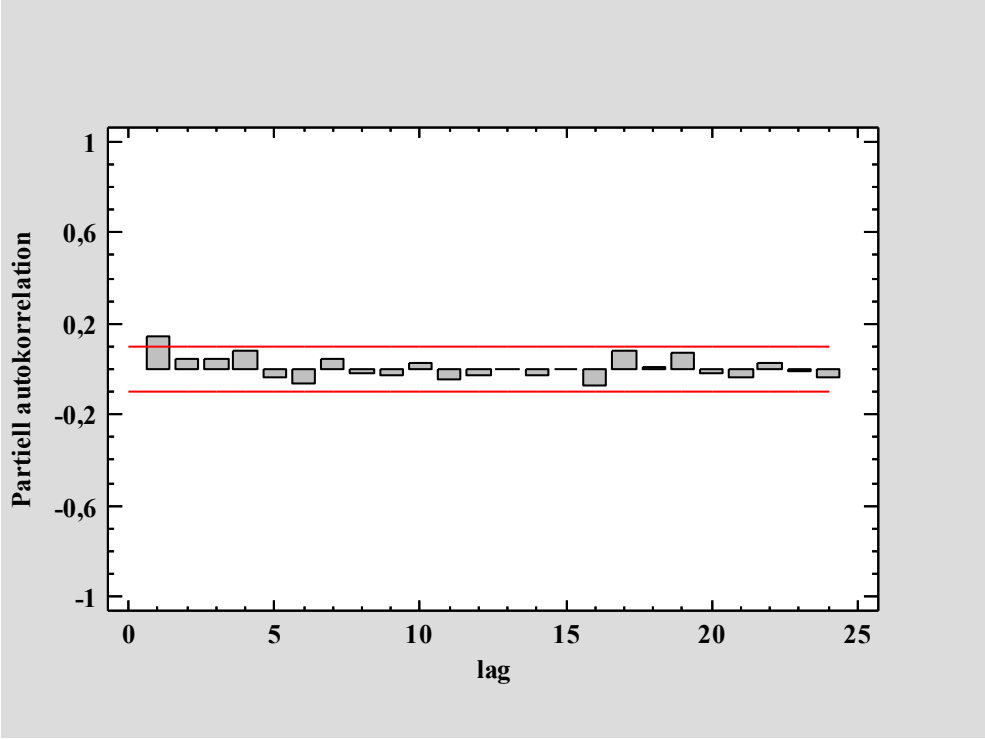
Bilaga D - figur 3. Cst 421a fas 1

Bilaga E

Nedan två diagram beskriver ACF samt PACF för den initialt valda fas 1 för spårväxel Cst 421a.

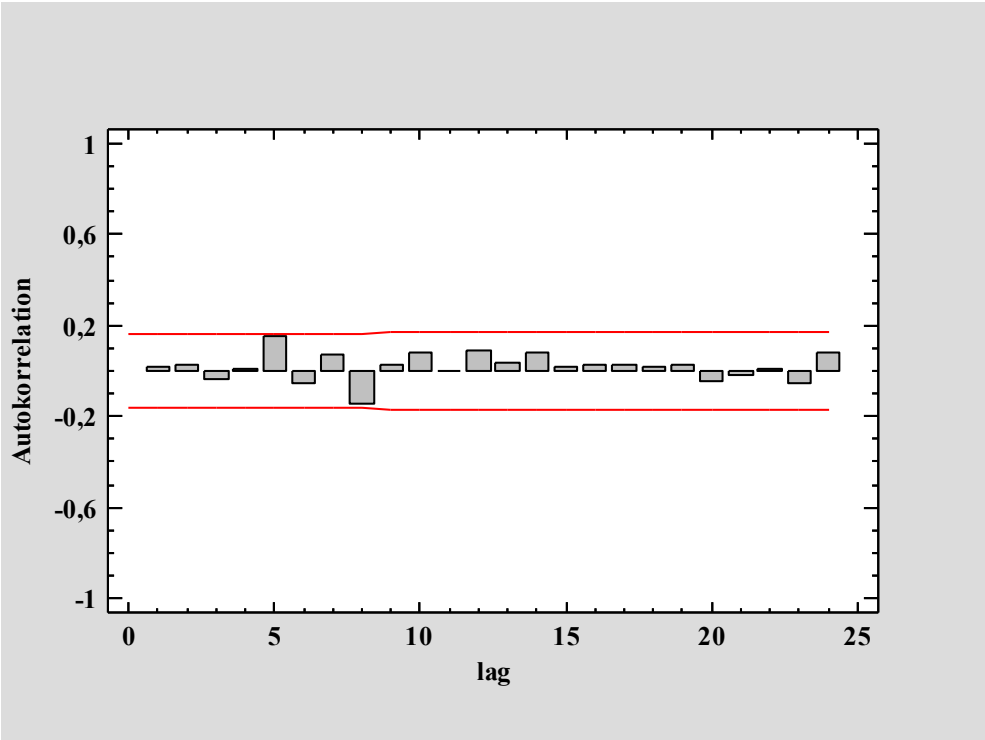


Bilaga E - figur 1. Cst 421a ACF för de 400 första mätvärdena

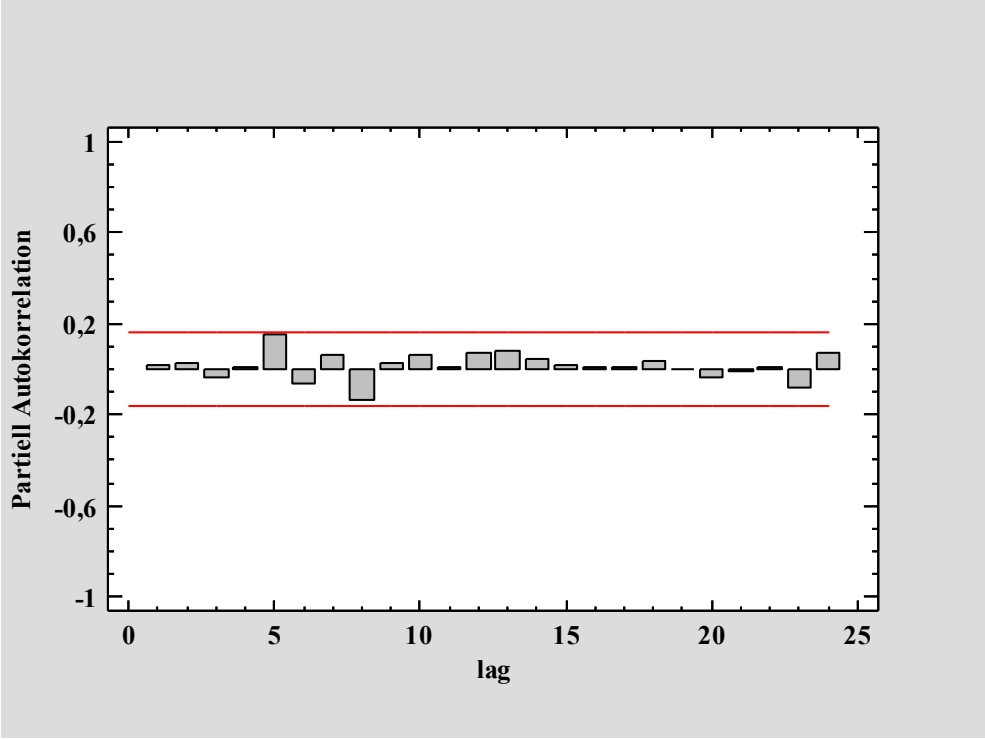


Bilaga E - figur 2. Cst 421a PACF för de 400 första mätvärdena

Nedan två diagram beskriver den slutligt valda fas 1 för spårväxel Cst 421a.

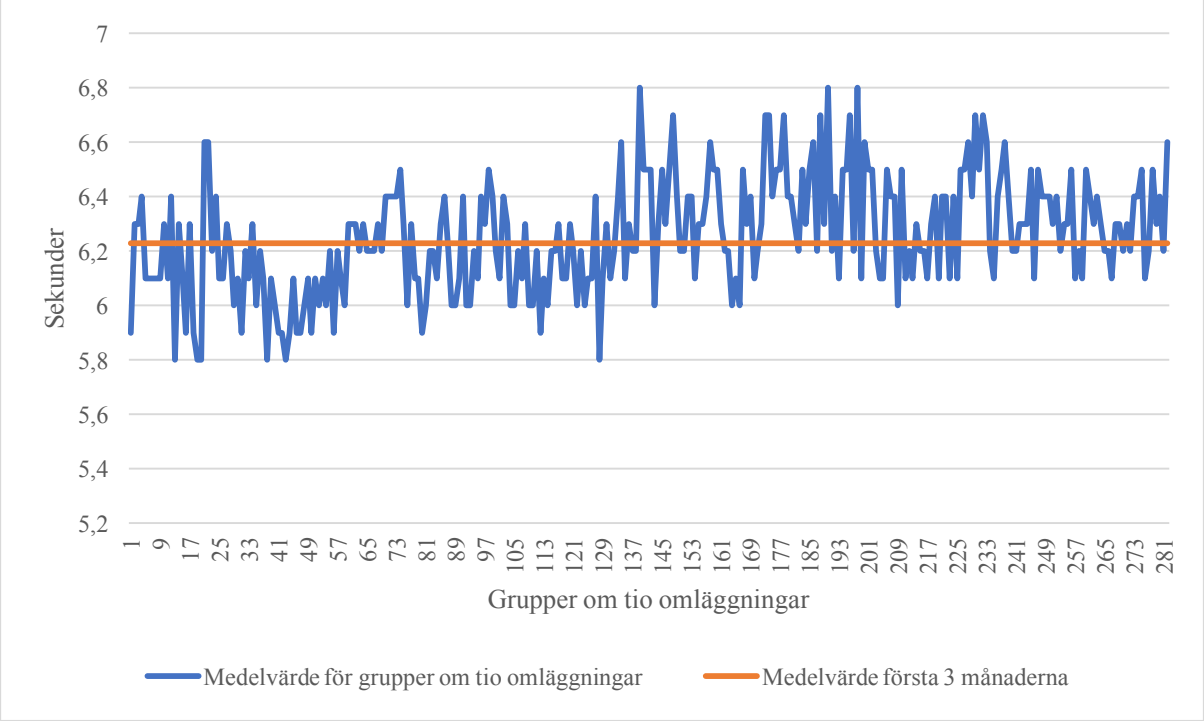


Bilaga E - figur 3. Cst 421a ACF fas 1

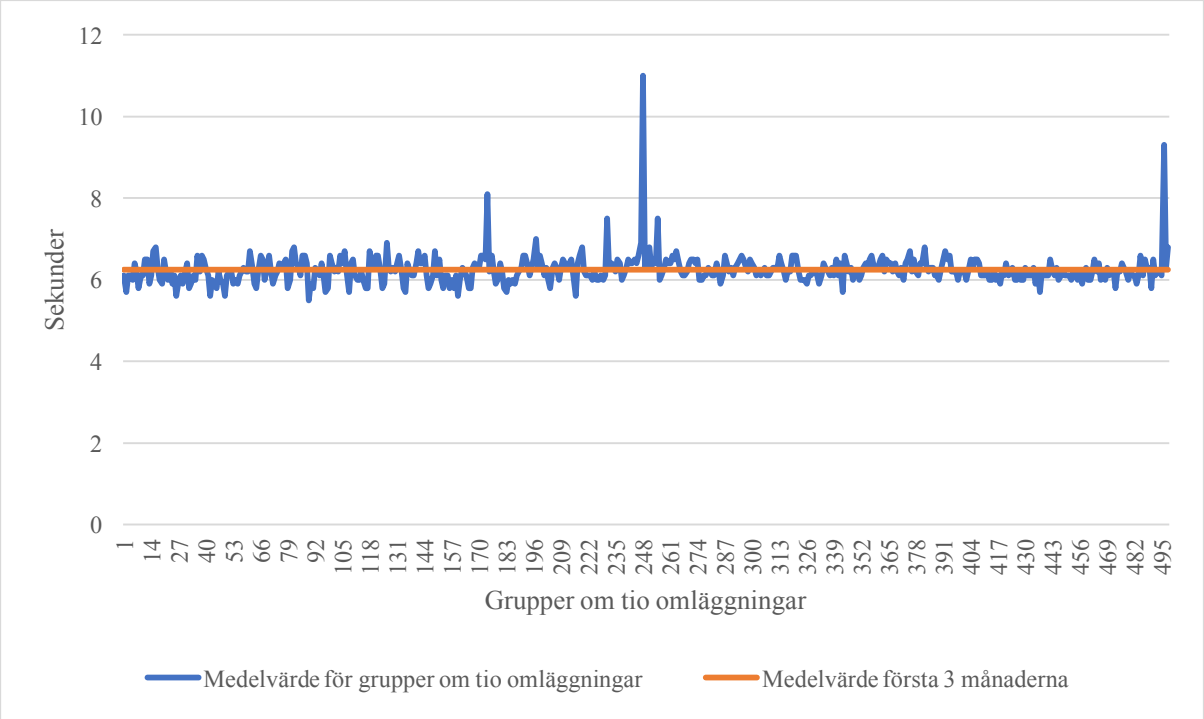


Bilaga E - figur 4. Cst 421a PACF fas 1

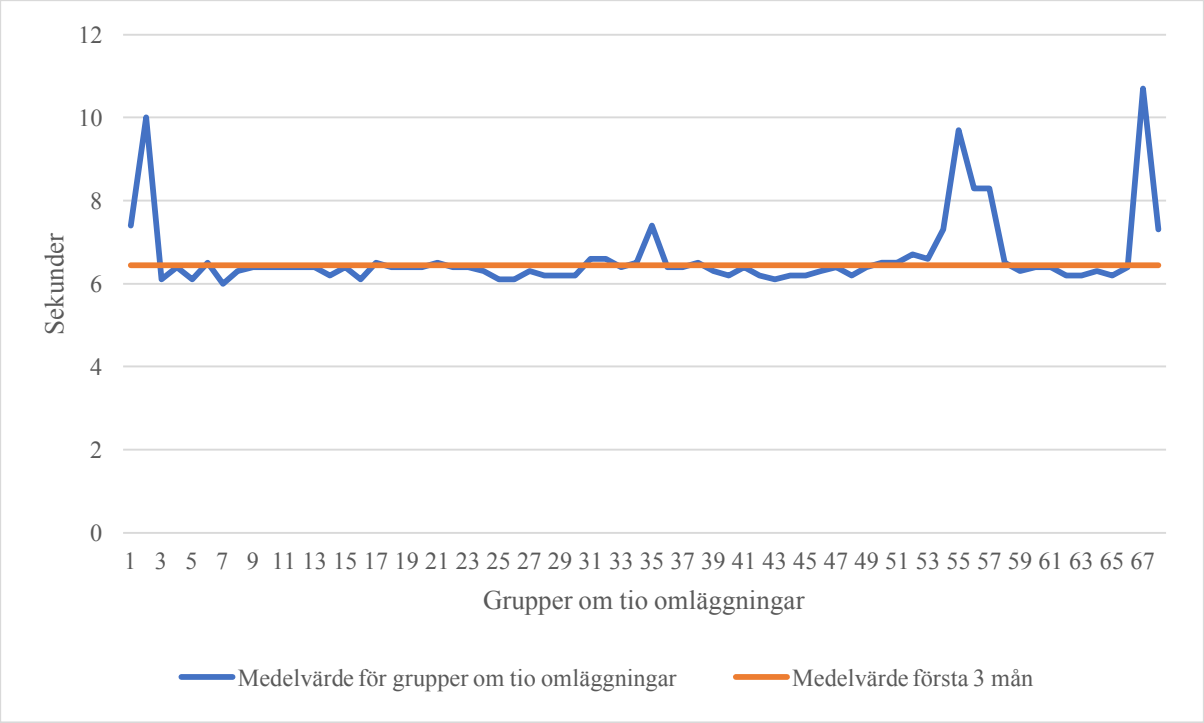
Bilaga F



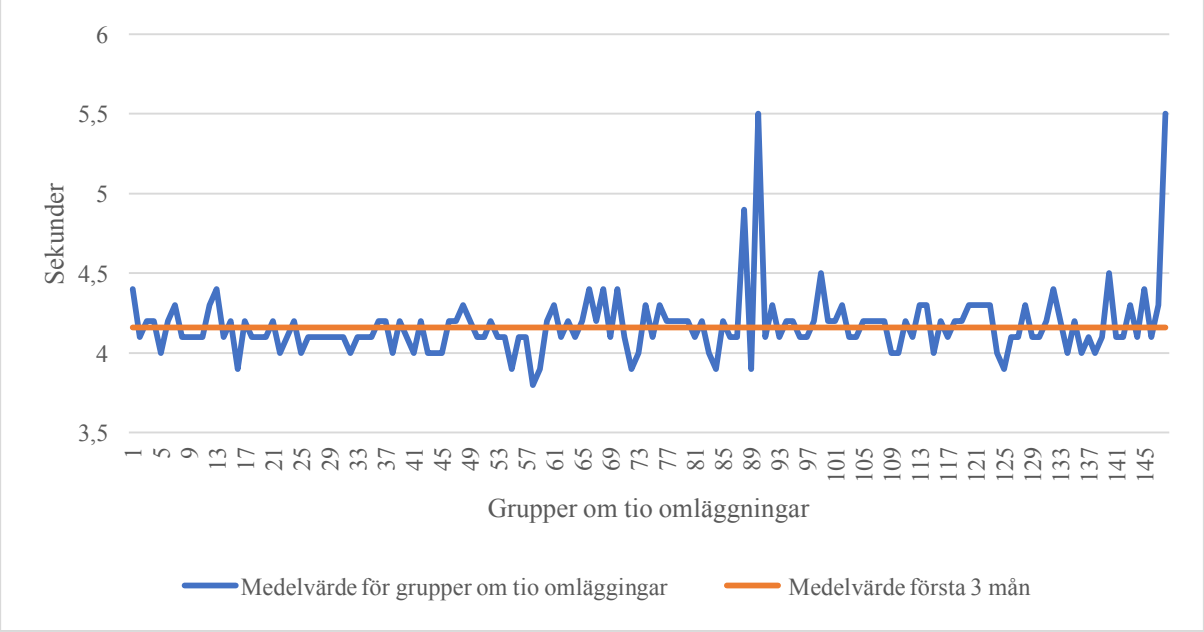
Bilaga F - figur 1. Cst 421a medelvärde av omläggningstid i grupper om tio fyra månader inför funktionsfel i Växellåda



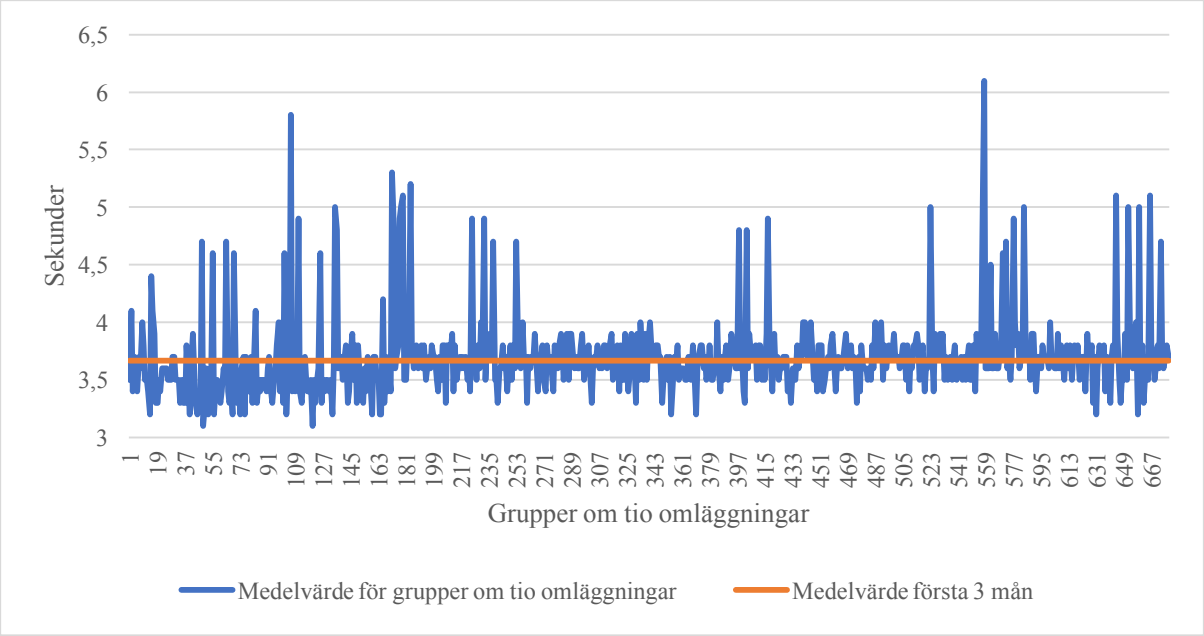
Bilaga F - figur 2. Cst 554b medelvärde av omläggningstid i grupper om tio fyra månader inför funktionsfel i Växellåda



Bilaga F - figur 3. Duo 131a medelvärde av omläggningstid i grupper om tio fyra månader inför funktionsfel i Växellåda

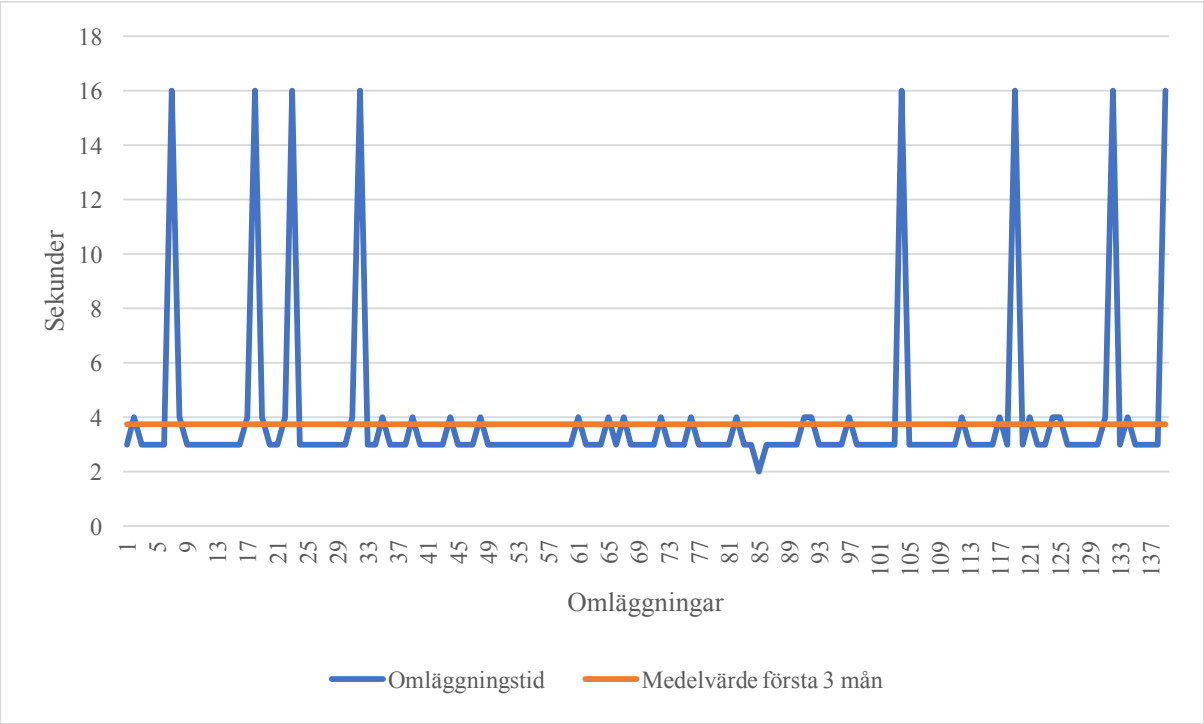


Bilaga F - figur 4. Ke148a medelvärde omläggningstid i grupper om tio fyra månader inför funktionsfel i Växellåda

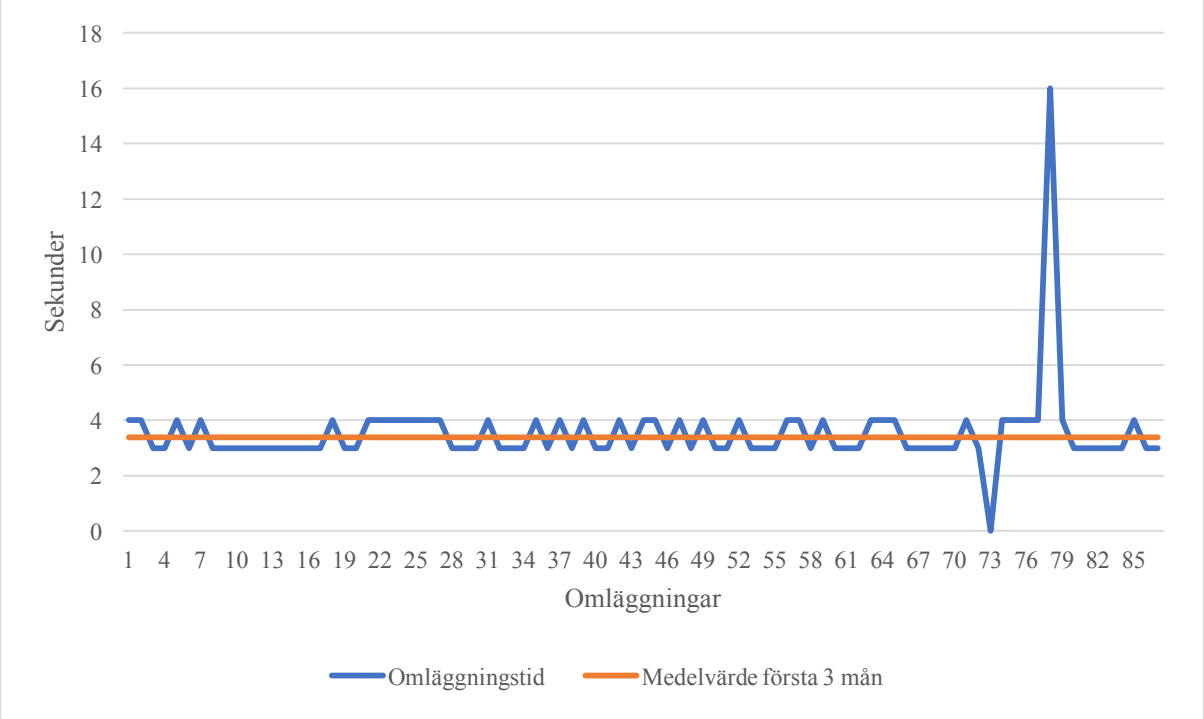


Bilaga F - figur 5. Skby 122 medelvärde omläggningstid i grupper om tio fyra månader inför funktionsfel i Växellåda

Bilaga G



Bilaga G - figur 1. Gn 132 omläggningstid fyra månader inför funktionsfel i Växellåda



Bilaga G - figur 2. Kmy 103 omläggningstid fyra månader inför funktionsfel i Växellåda